



Centre National  
de la Recherche  
Scientifique



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

LPENS  
LABORATOIRE DE PHYSIQUE  
DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE



# Inflation et trous noirs primordiaux

**Vincent Vennin**

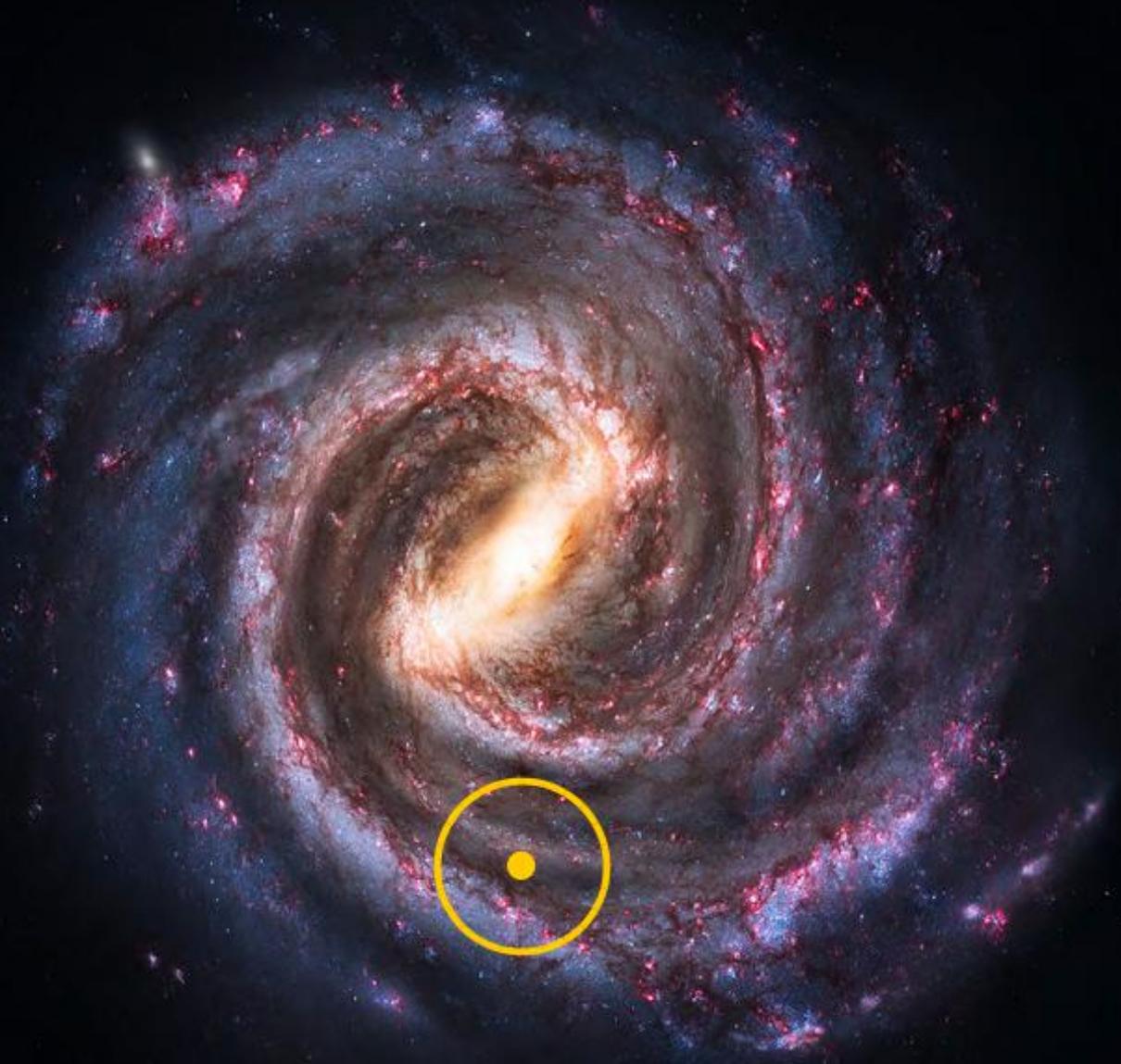
Collège de France, cours de Françoise Combes

**18 novembre 2024**

# La Voie Lactée



Vous êtes ici



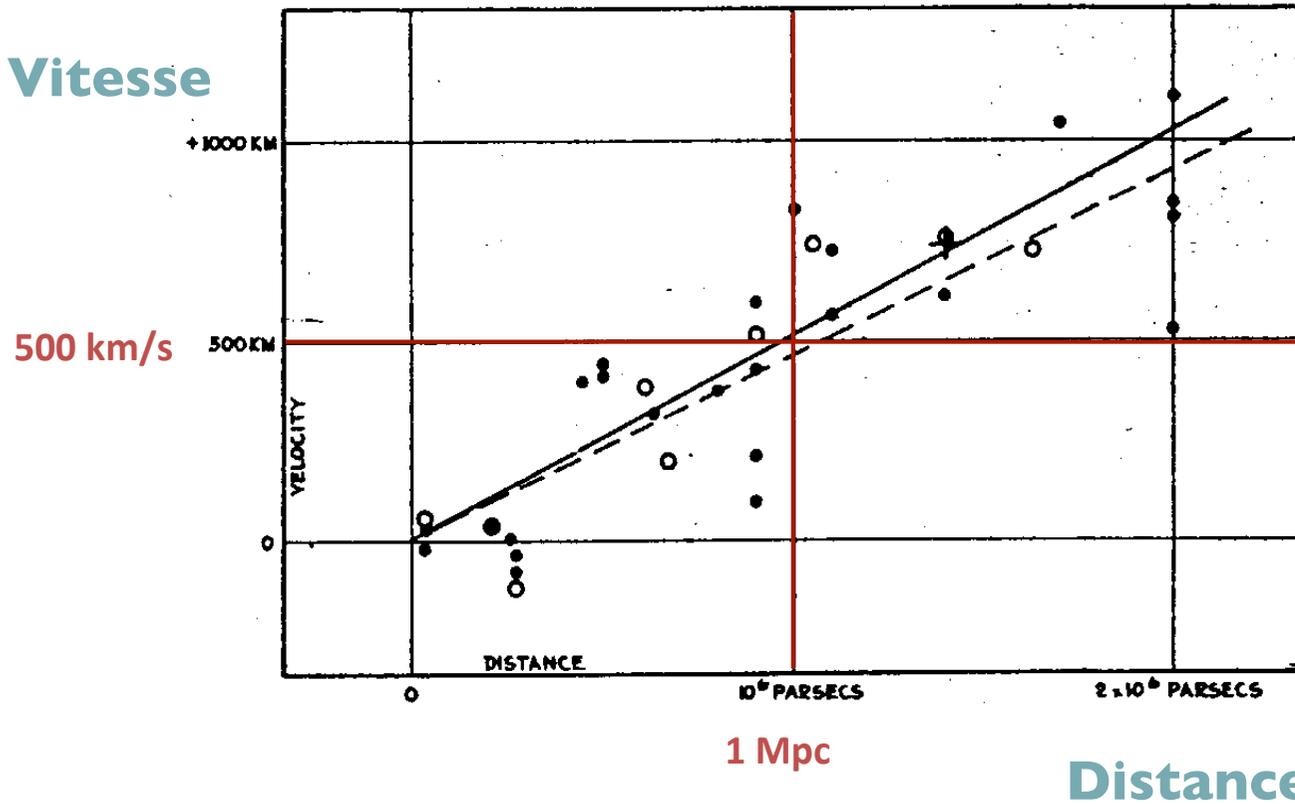
Nombre max d'étoiles visibles à l'œil nu : **3000**

# PROGRAMME

- **Modèle du Big-Bang chaud et ses problèmes**
- **Inflation cosmique**
- **Trous noirs primordiaux**

# Loi de Hubble

Vitesse



E. Hubble, Astrophysical Journal, vol. 74, 1929

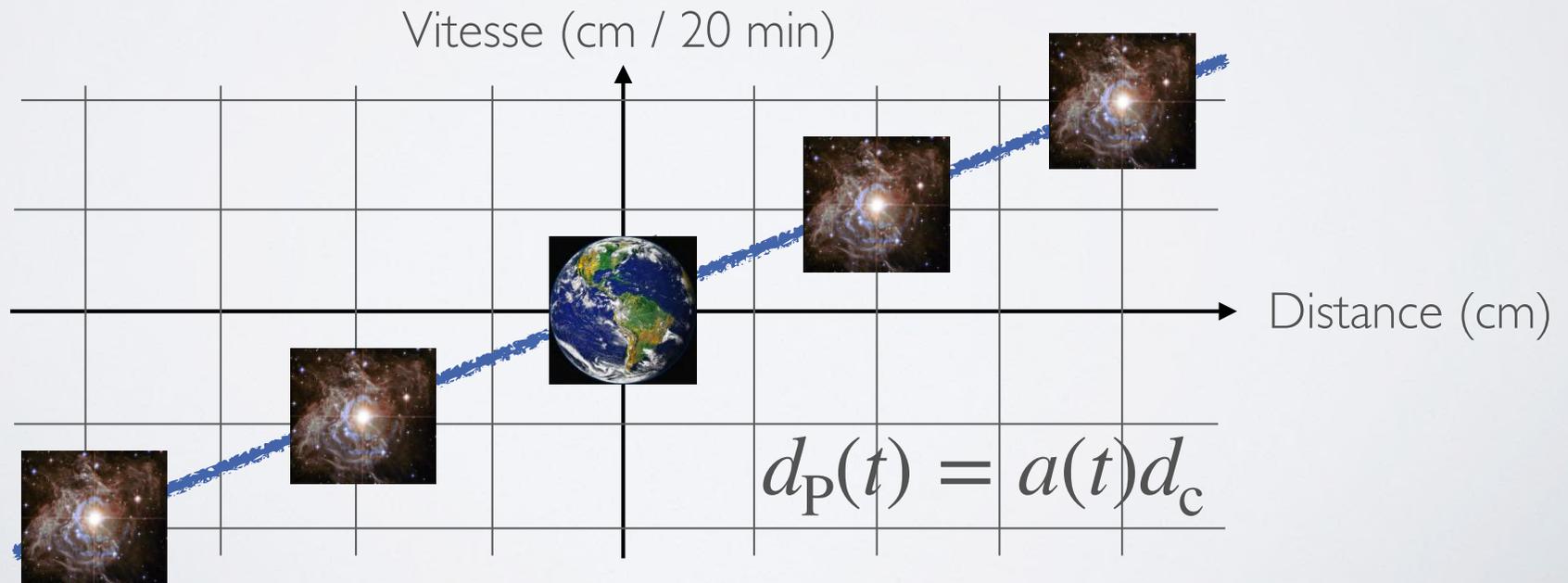
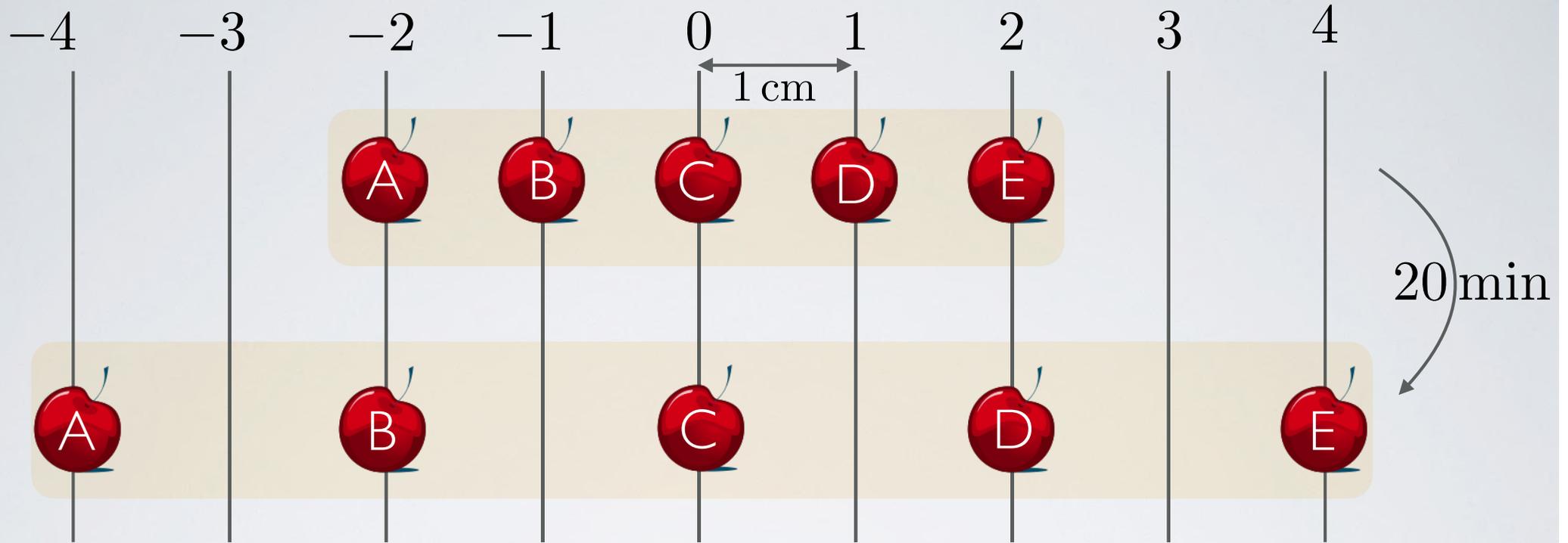


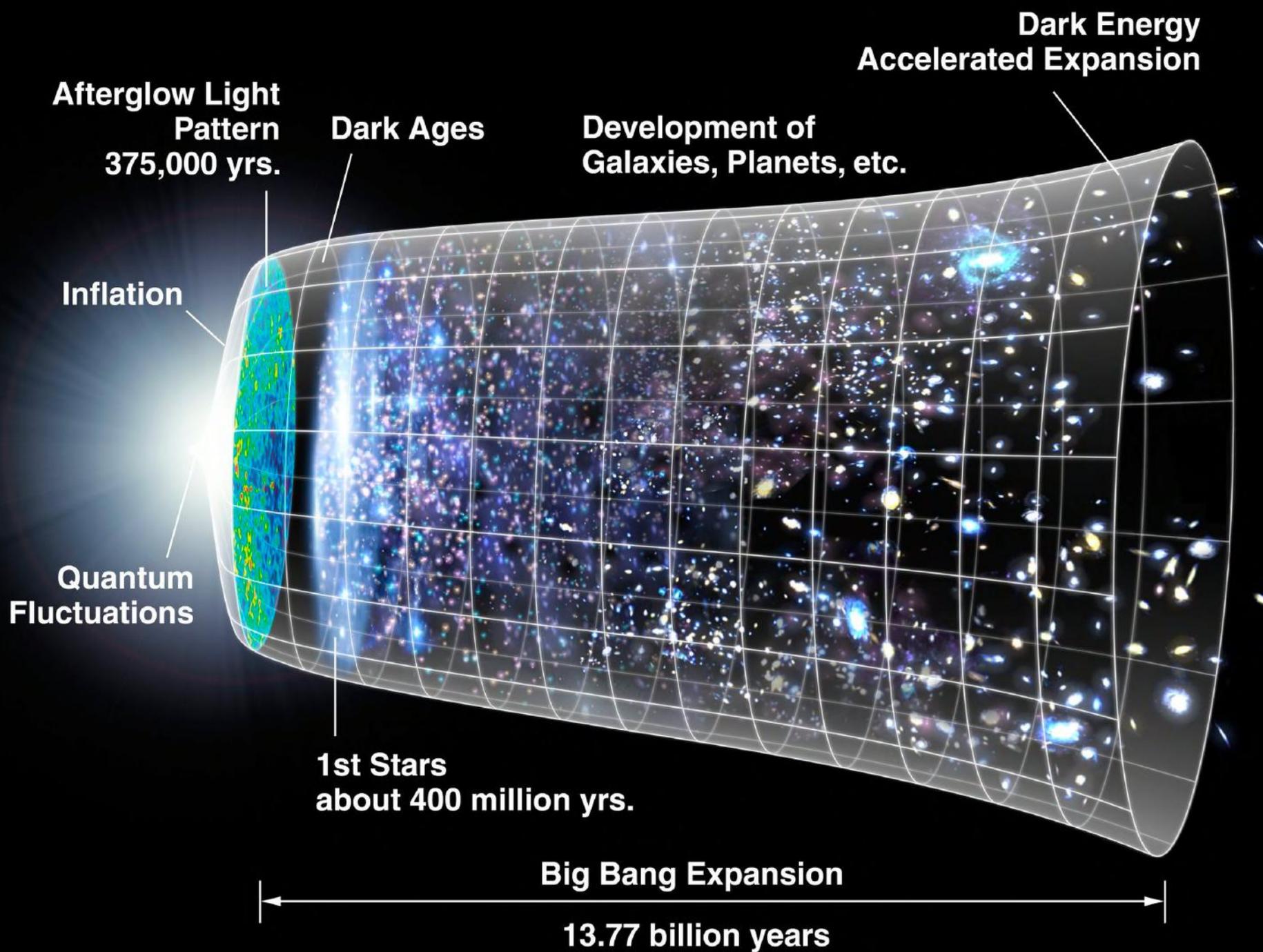
Edwin Hubble (1889-1953)

$$H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc} ?$$

$$v = HD$$

# Un univers-clafoutis en expansion

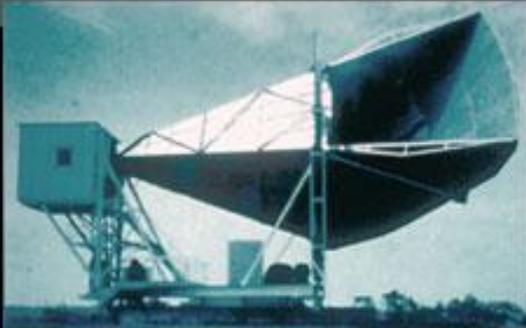




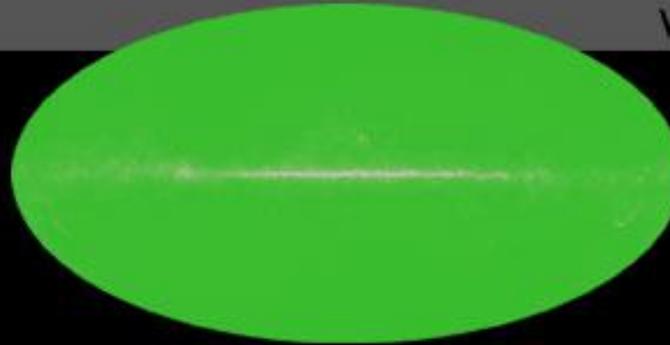
Plus on remonte dans le temps, plus l'univers est petit, chaud et dense.

# Fonds diffus cosmologique

1965



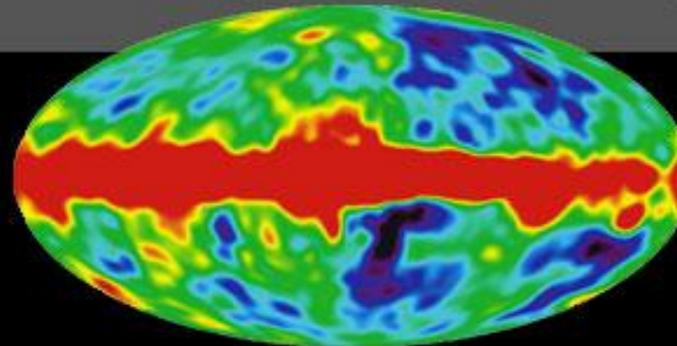
Penzias and  
Wilson



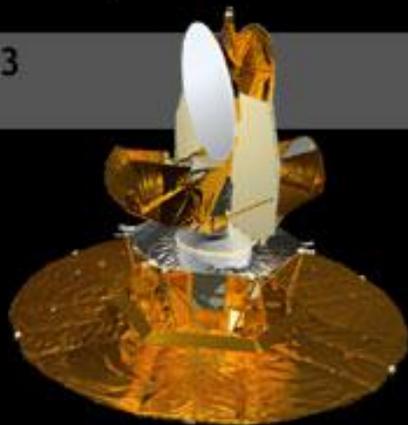
1992



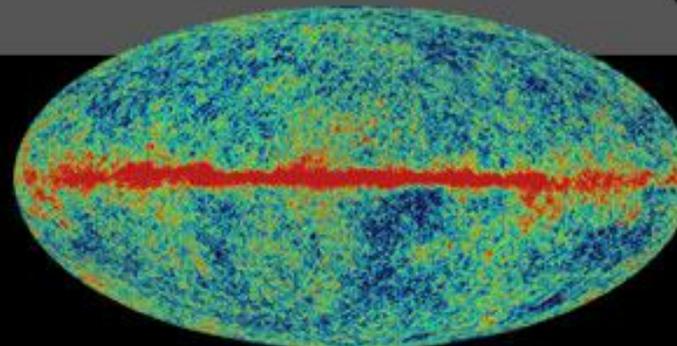
COBE



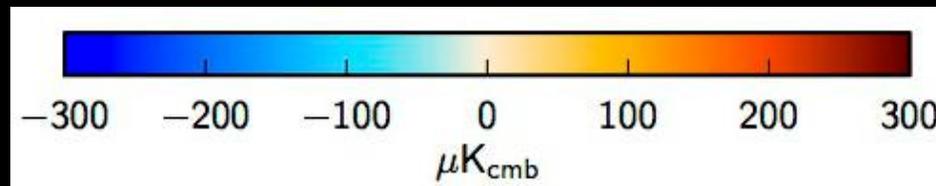
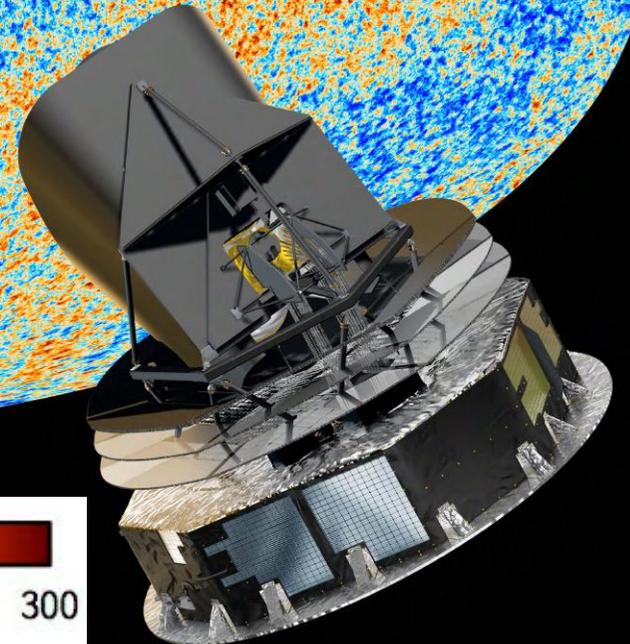
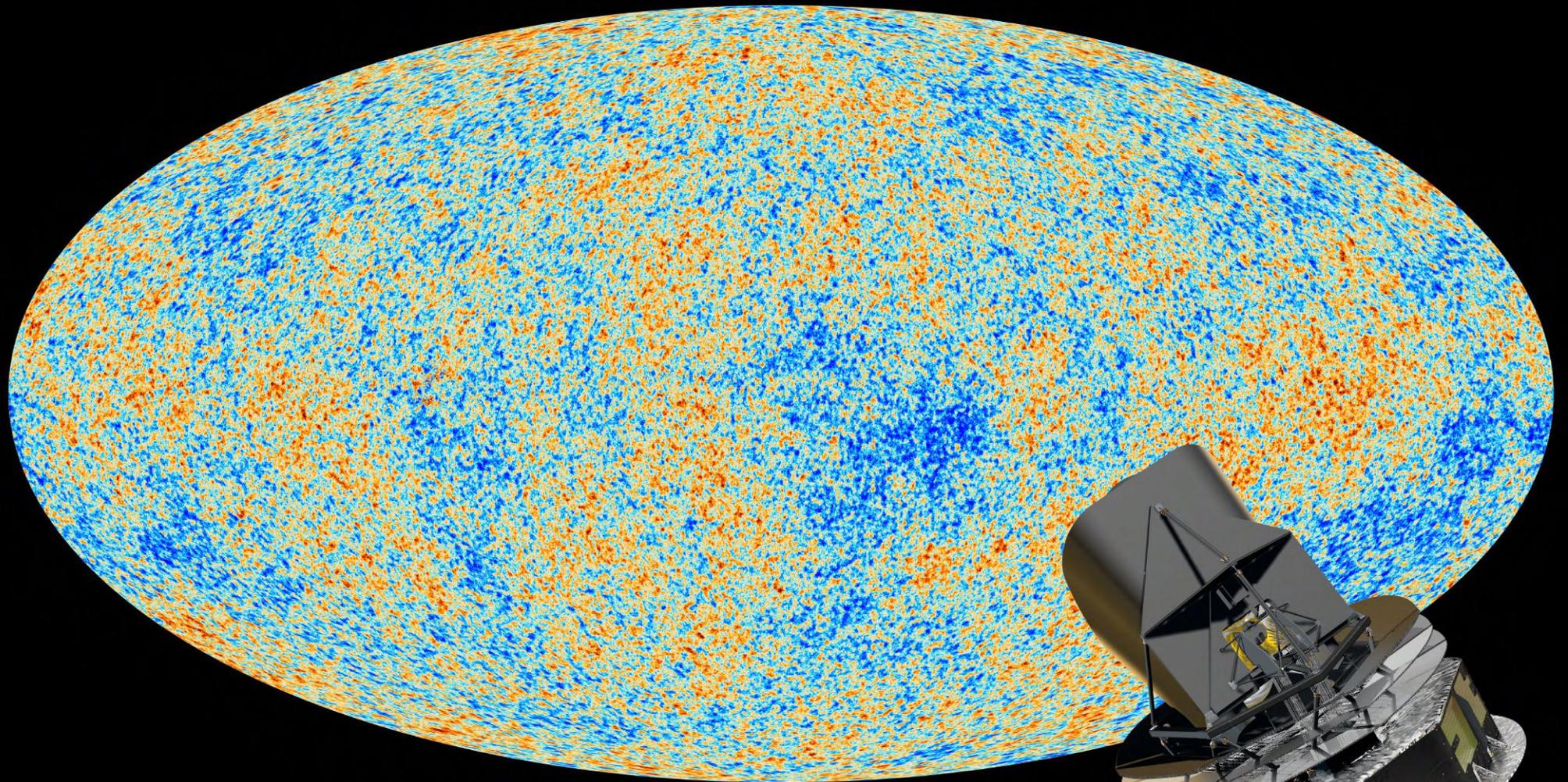
2003



WMAP



# Fonds diffus cosmologique



# LES PROBLÈMES DU MODÈLE DU BIG-BANG CHAUD

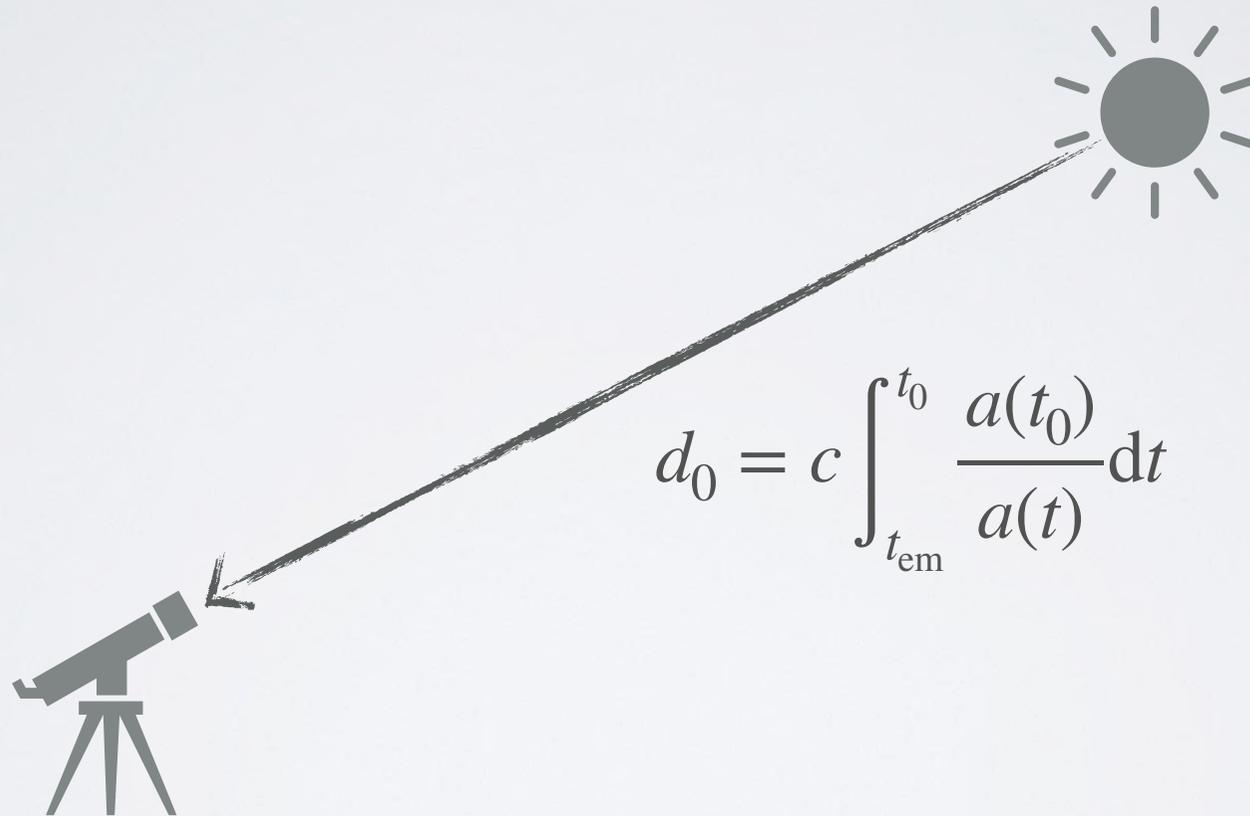
## **1. Problème de l'horizon**

2. Problème de la platitude
3. Problème des monopoles

# HORIZON COSMOLOGIQUE

La lumière voyage à une vitesse finie

$$c = 299\,792\,458 \text{ m / s}$$

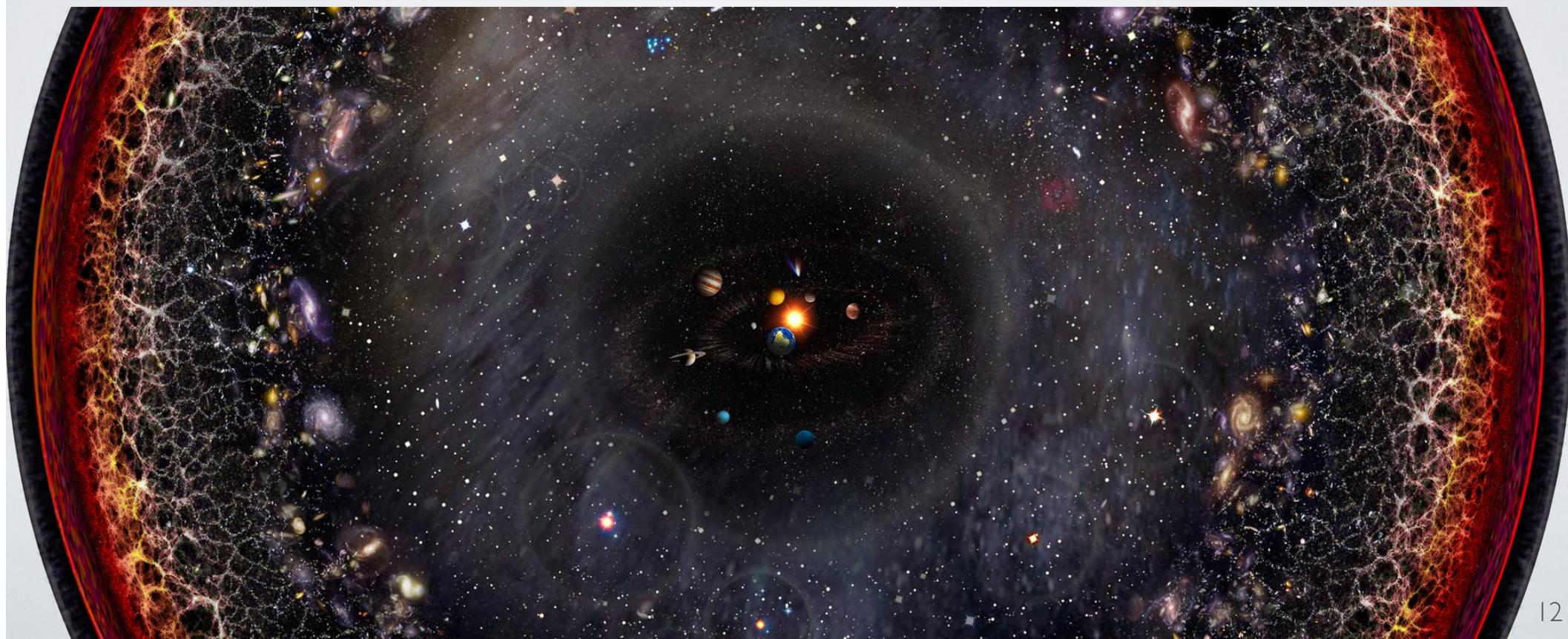


$d_0$  est maximale lorsque  $t_{em}$  est l'instant du Big Bang ( $a = 0$ ).

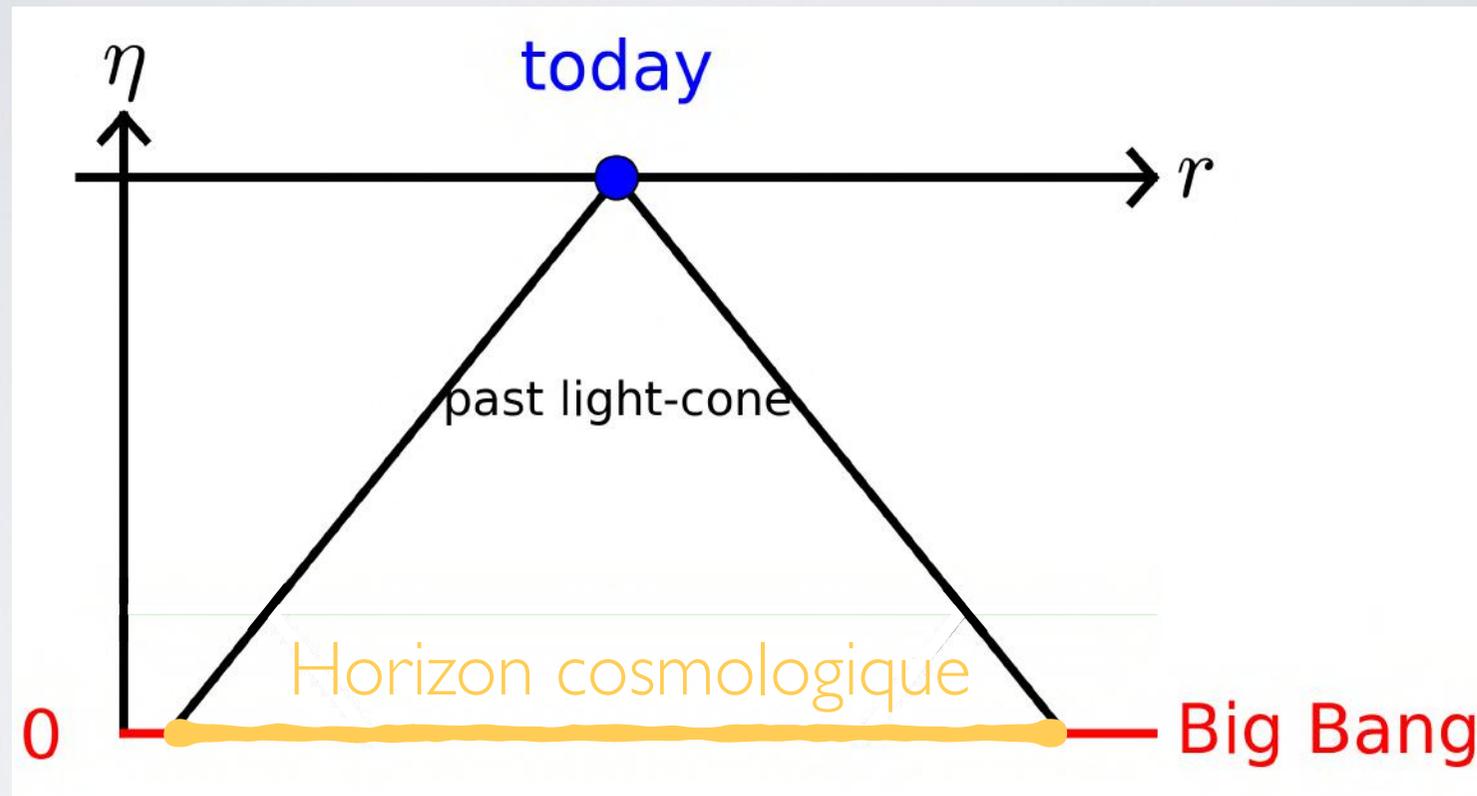
Est ce que  $d_0$  est fini?

# HORIZON COSMOLOGIQUE

Distance au point le plus lointain d'où peut provenir la lumière observée aujourd'hui

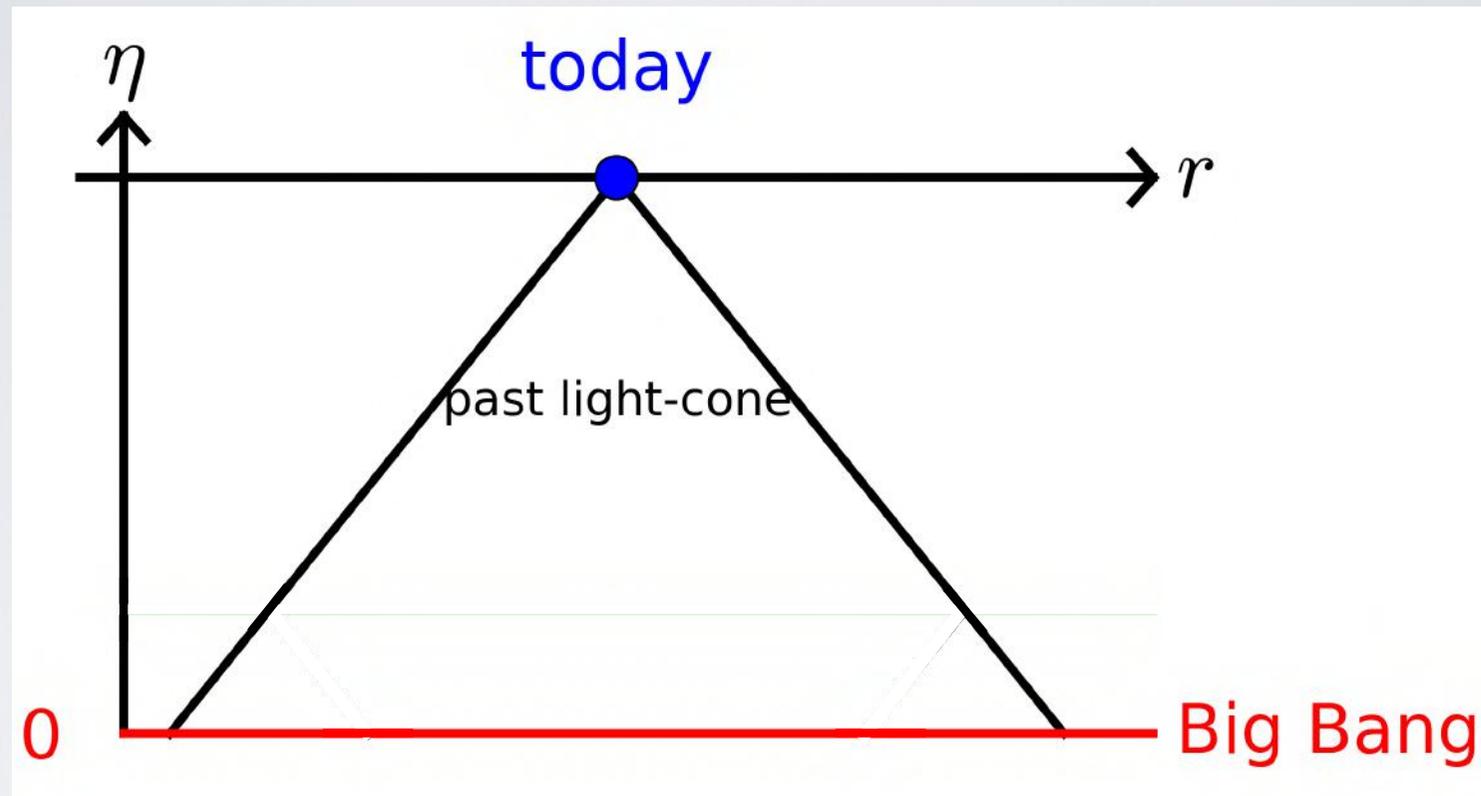


# PROBLÈME DE L'HORIZON

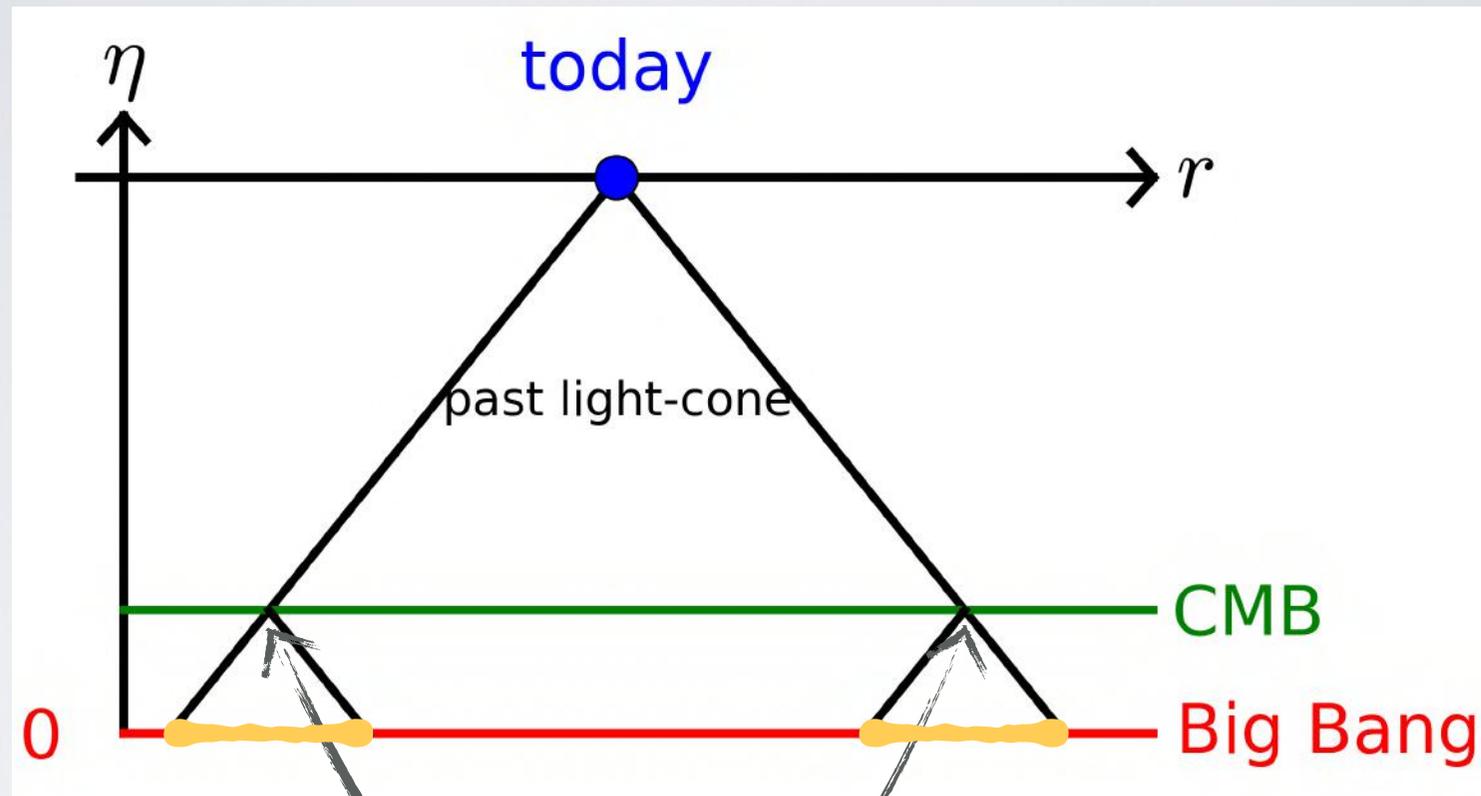


$$d_0 = c \int_{t_{\text{em}}}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \quad \xrightarrow{dt = a d\eta} \quad d_0 = c (\eta - \eta_0)$$

# PROBLÈME DE L'HORIZON



# PROBLÈME DE L'HORIZON



causalement déconnectés

# PROBLÈME DE L'HORIZON

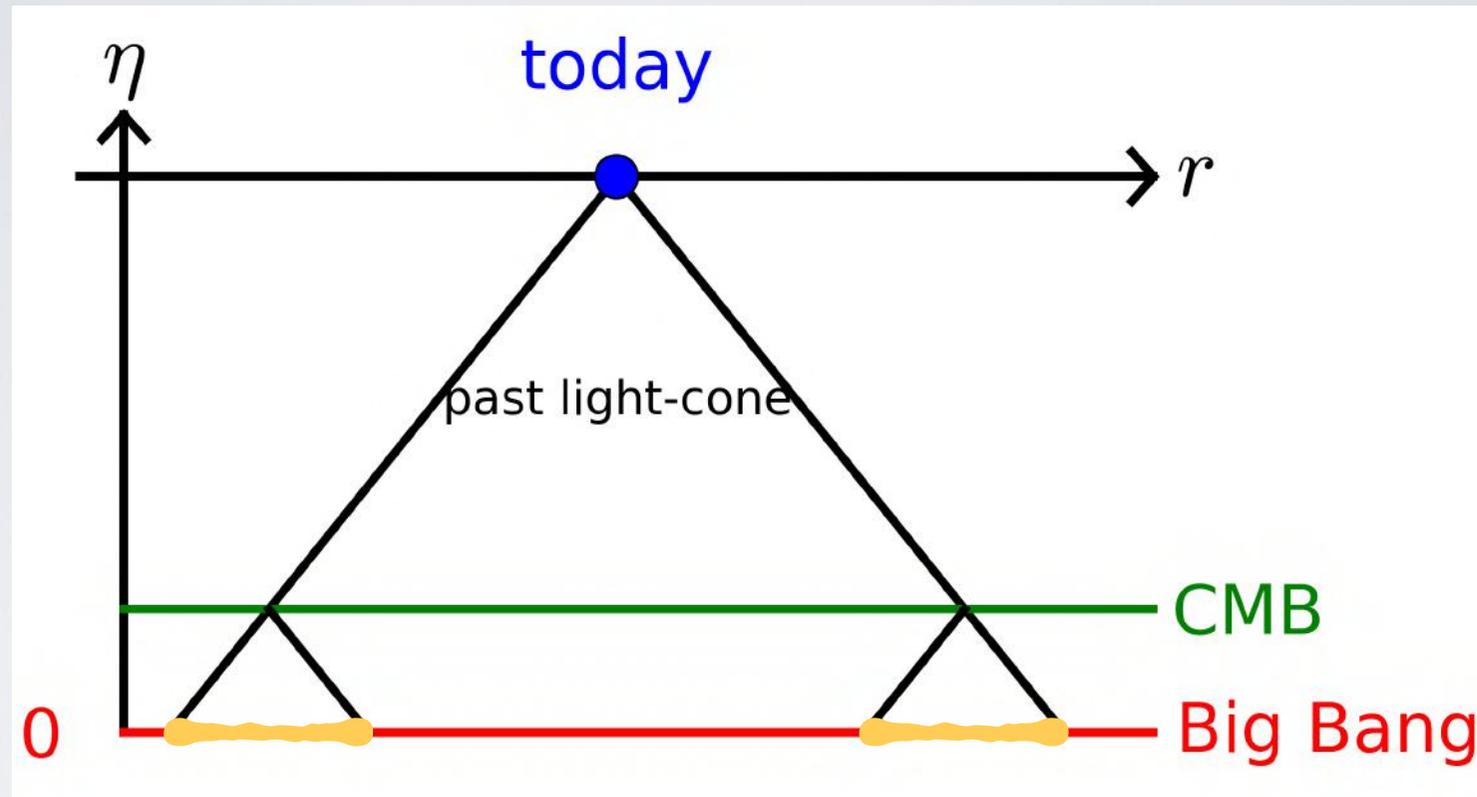
Penzias and Wilson, 1965

**Pourquoi la température est-elle la même dans tous les patches?**

Taille angulaire de l'horizon cosmologique au moment du découplage  $\sim 1/2$  deg  $\sim$  diamètre angulaire de la Lune

Le CMB est constitué de 45 000 patches causalement déconnectés <sub>16</sub>

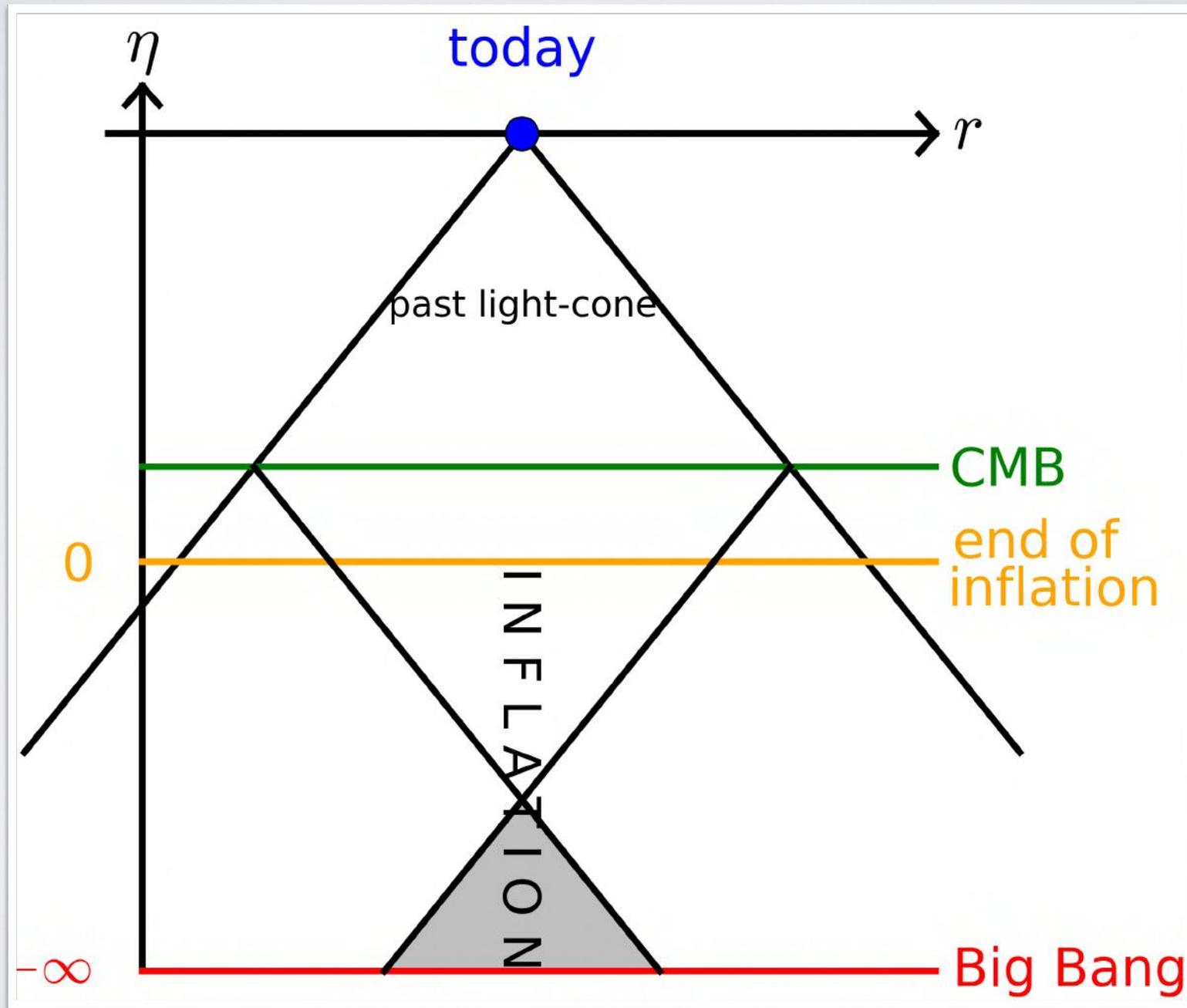
# PROBLÈME DE L'HORIZON



$$d_0 = c \int_{t_{\text{em}}}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \quad \xrightarrow{dt = ad\eta} \quad d_0 = c (\eta - \eta_0)$$

Et si l'intégrale ne converge pas quand  $t_{\text{em}} \rightarrow 0$  ? 17

# PROBLÈME DE L'HORIZON



# PROBLÈME DE L'HORIZON

$$d_0 = c \int_{t_{\text{em}}}^{t_0} \frac{dt}{a(t)}$$

$dt = a d\eta$

$$d_0 = c (\eta - \eta_0)$$

Et si l'intégrale ne converge pas quand  $t_{\text{em}} \rightarrow 0$  ?

$$a(t) \propto t^p \longrightarrow \ddot{a} \propto p(p-1)t^{p-2}$$

$$1/t^p \text{ est non integrable si } p > 1 \longrightarrow \ddot{a} > 0$$

**Inflation = expansion accélérée**

Avec l'inflation, dans le passé, deux points diamétralement opposés du CMB sont bien plus proches ... et sont donc en contact causal!

# COMMENT REALISER L'INFLATION?

Théorie de la Gravité:  $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4}{3}\pi G_N (\rho + 3p)$

On veut  $\ddot{a} > 0$

L'inflation requiert un fluide avec une pression négative... et la **relativité générale!**



pas un fluide ordinaire...

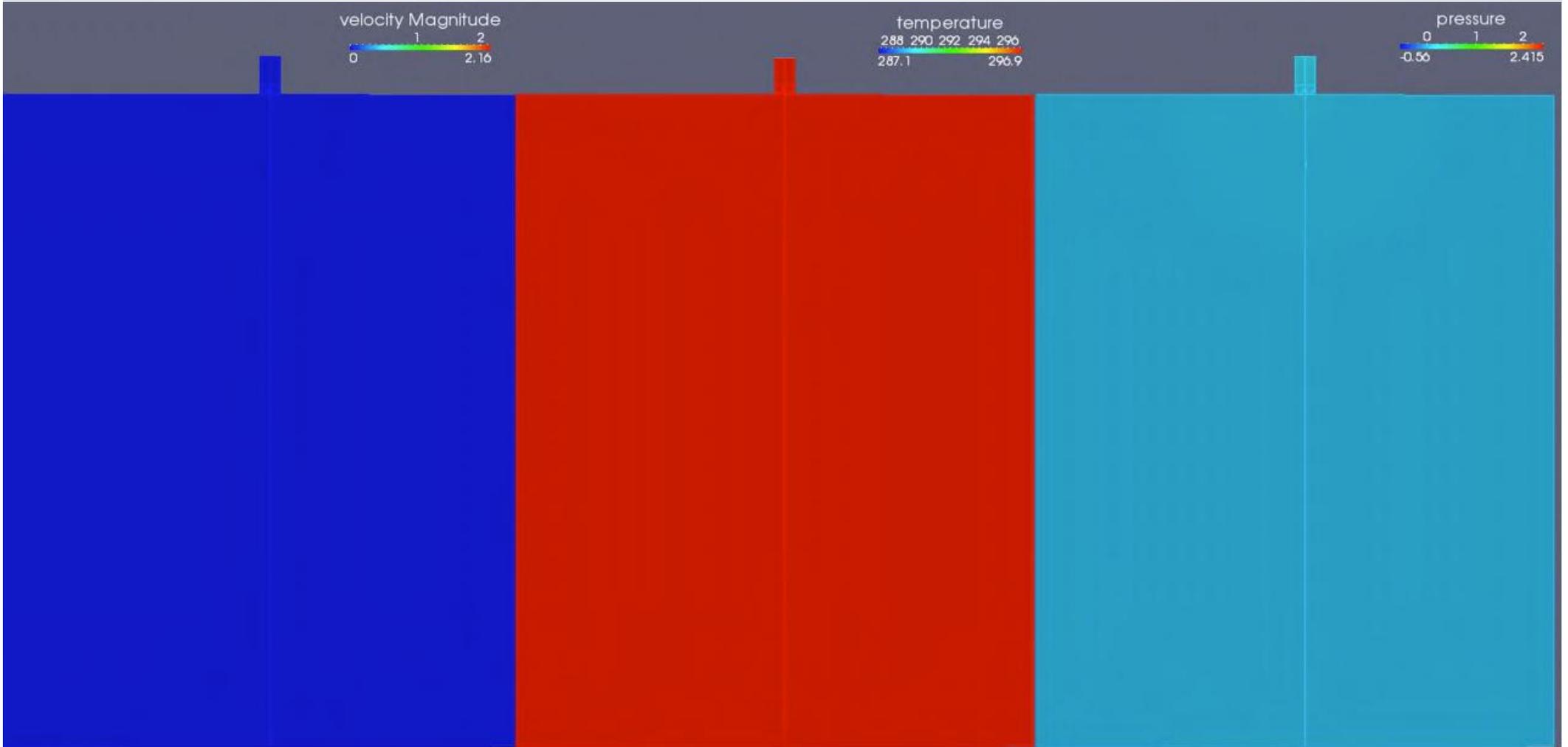
L'inflation se déroule à hautes énergies: la matière doit être décrite avec des champs!

# CHAMPS SCALAIRE

velocity Magnitude  
0 1 2  
2.16

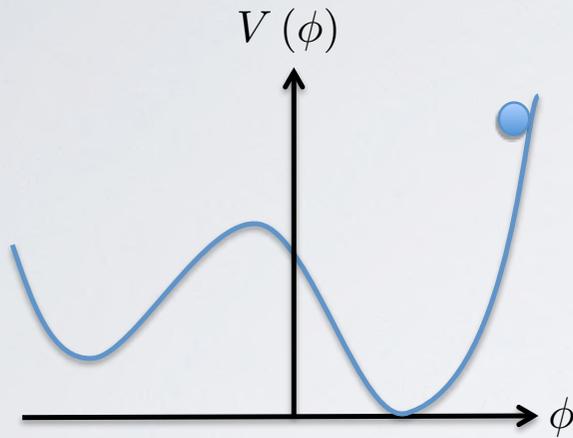
temperature  
288 290 292 294 296  
287.1 296.9

pressure  
0 1 2  
-0.56 2.415



# INFLATON

Un champs scalaire homogène  $\phi(t)$



$$\rho = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi)$$

$$p = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi)$$

Rappel:  $\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4}{3}\pi G_N (\rho + 3p) > 0 \longrightarrow V(\phi) > \dot{\phi}^2$

Régime de “roulement lent”, potentiel suffisamment plat... difficile à construire!

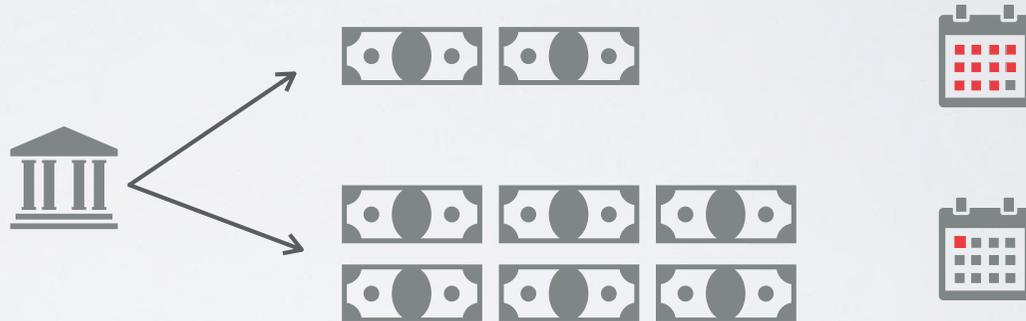
Inflaton = boson de Higgs? Champs de la supersymmetrie? supergravité?  
théorie des cordes? autre chose?

# FLUCTUATIONS QUANTIQUES

Moment conjugué

Energie  $\longleftrightarrow$  Temps

$$\Delta_E \Delta_t = \frac{\hbar}{2}$$



Le vide quantique est tel une banque ... qui réclame vite l'argent prêté!

$$\hbar \simeq 1.8 \times 10^{-16} \text{eV} \cdot \text{sec} \simeq 1.2 \times 10^{-51} \text{kg} \cdot \text{sec}$$

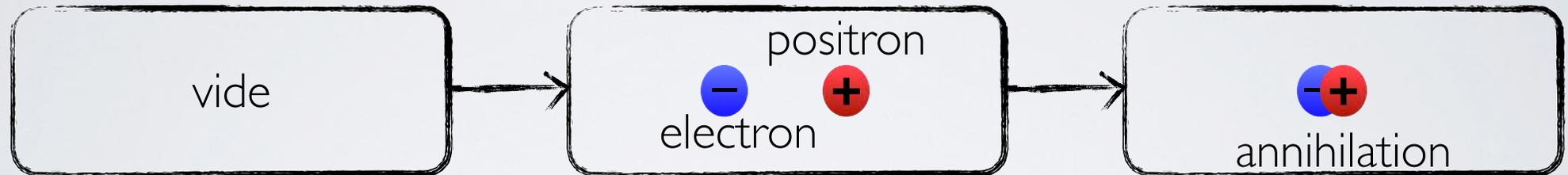
$$m_p \simeq 1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$$

$$m_e \simeq 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$$

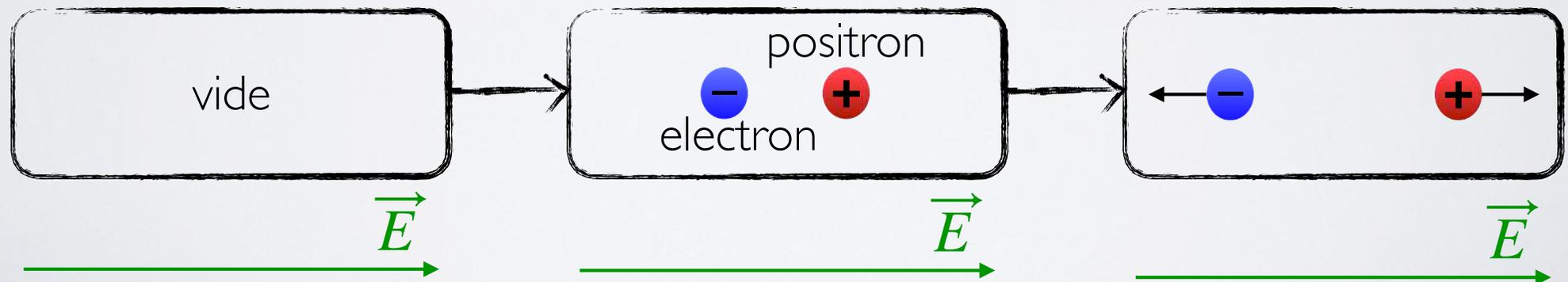
On peut "emprunter" au vide un proton pendant  $10^{-25}$  sec, ou un électron pendant  $10^{-21}$  sec

# FLUCTUATIONS QUANTIQUES

Création spontanée de paires de particules / antiparticules



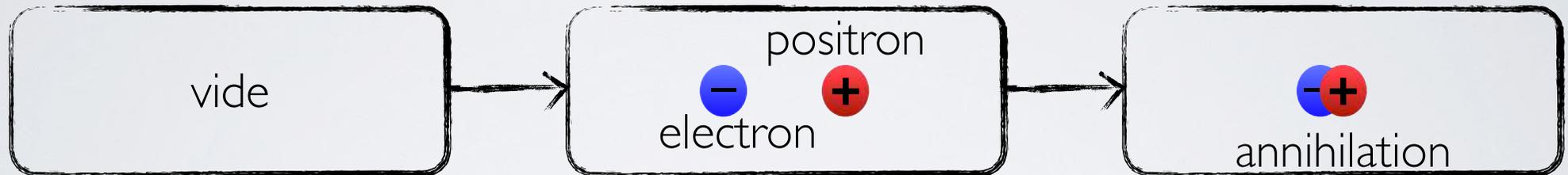
Dans un champs électrique intense



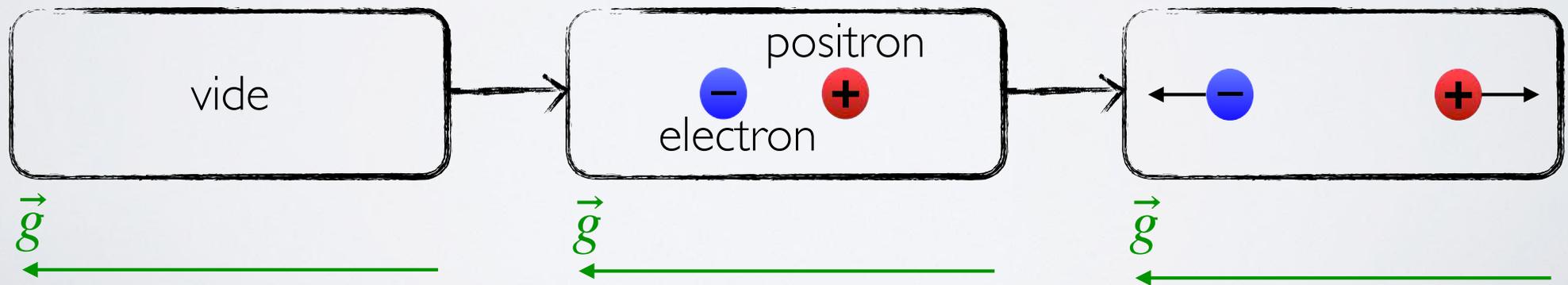
EFFET SCHWINGER

# FLUCTUATIONS QUANTIQUES

Création spontanée de paires de particules / antiparticules

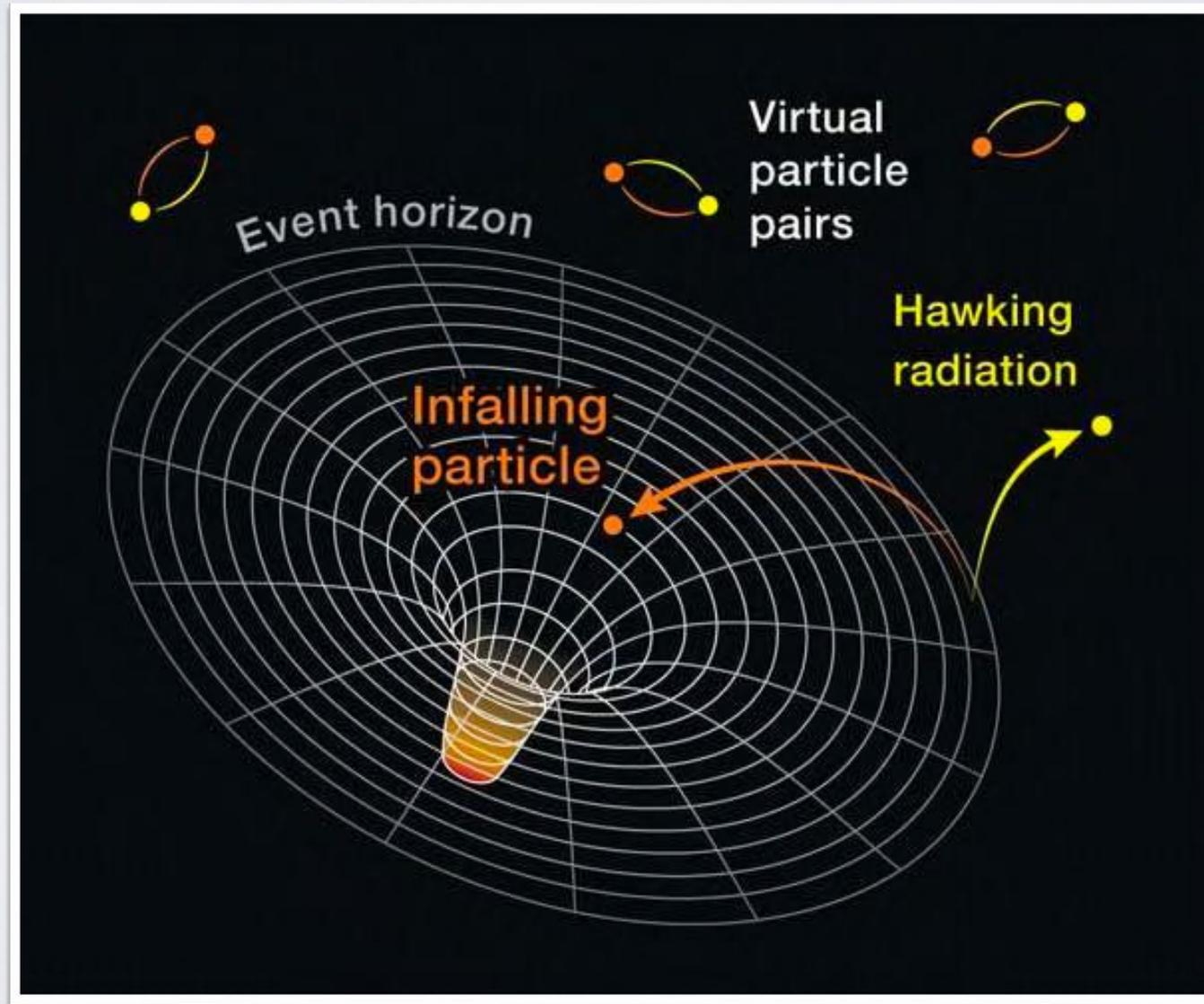


Dans un champs gravitationnel intense



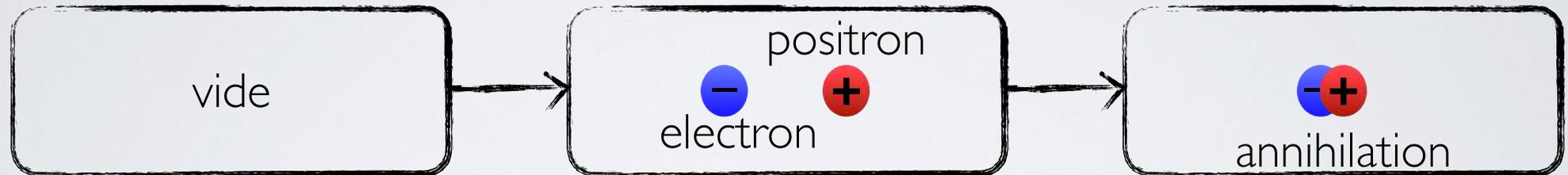
EFFET HAWKING

# RADIATION DE HAWKING

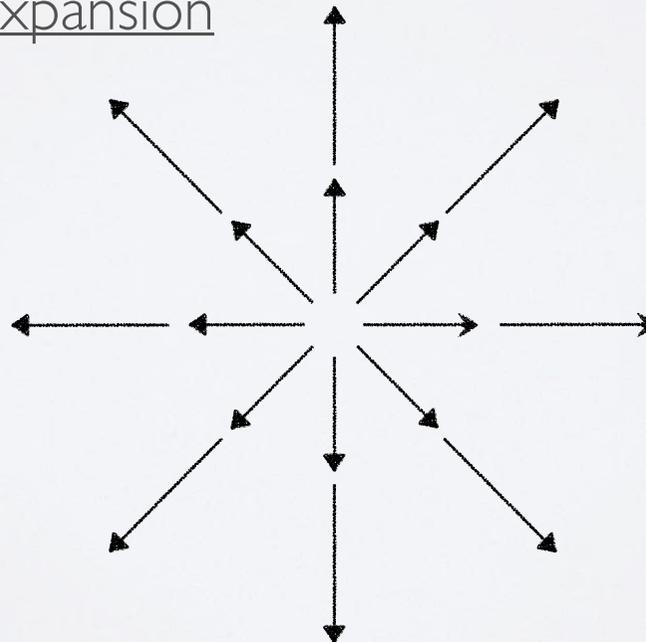


# FLUCTUATIONS QUANTIQUES

Création spontanée de paires de particules / antiparticules

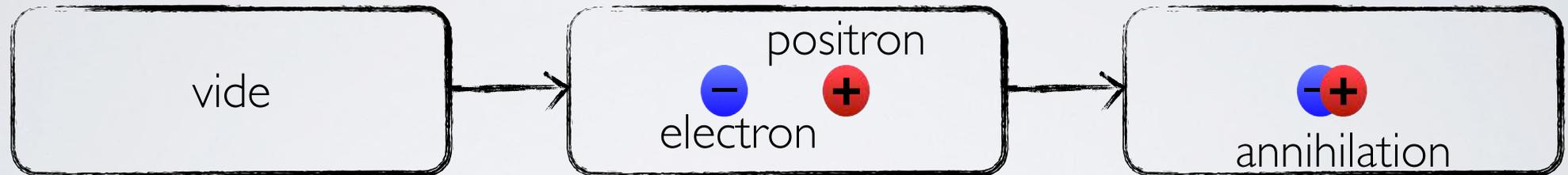


Dans un espace-temps en expansion

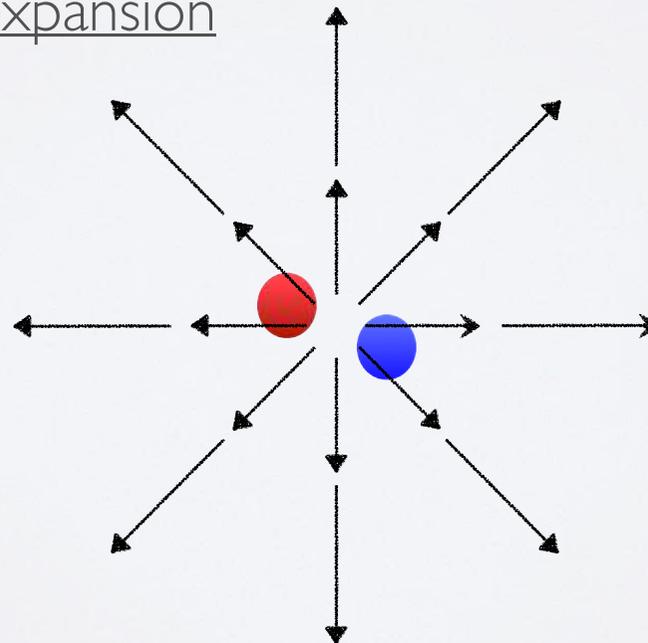


# FLUCTUATIONS QUANTIQUES

Création spontanée de paires de particules / antiparticules

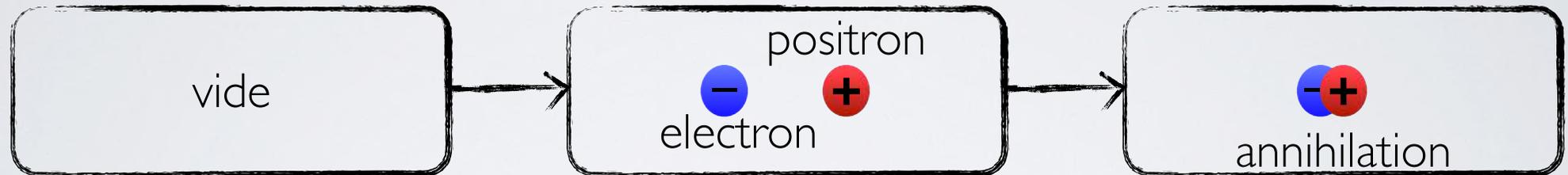


Dans un espace-temps en expansion

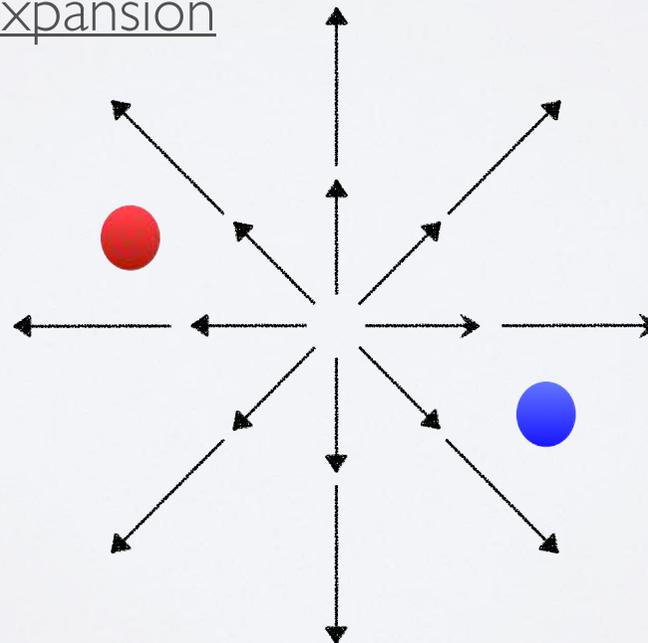


# FLUCTUATIONS QUANTIQUES

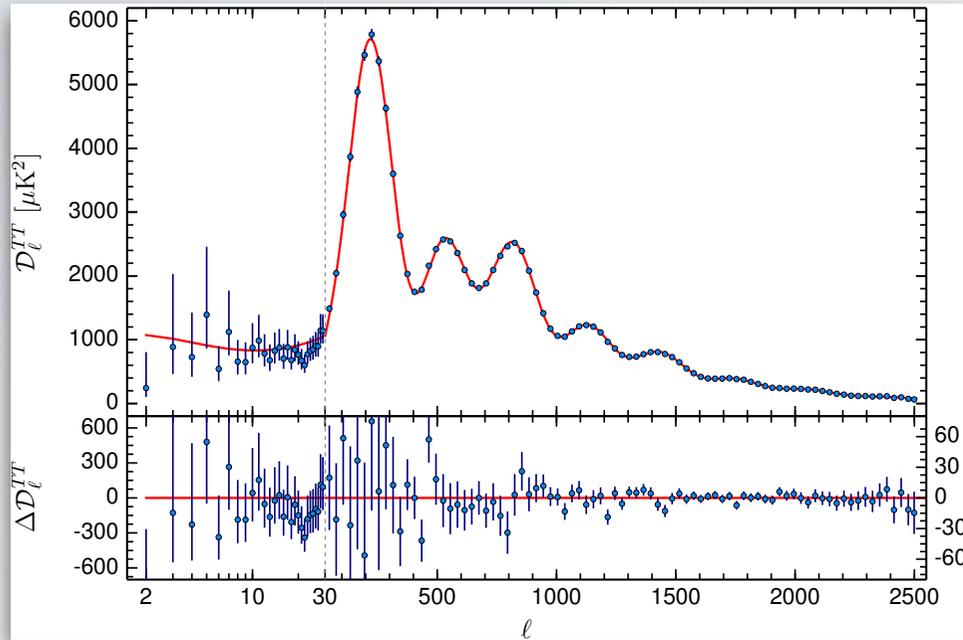
Création spontanée de paires de particules / antiparticules



Dans un espace-temps en expansion

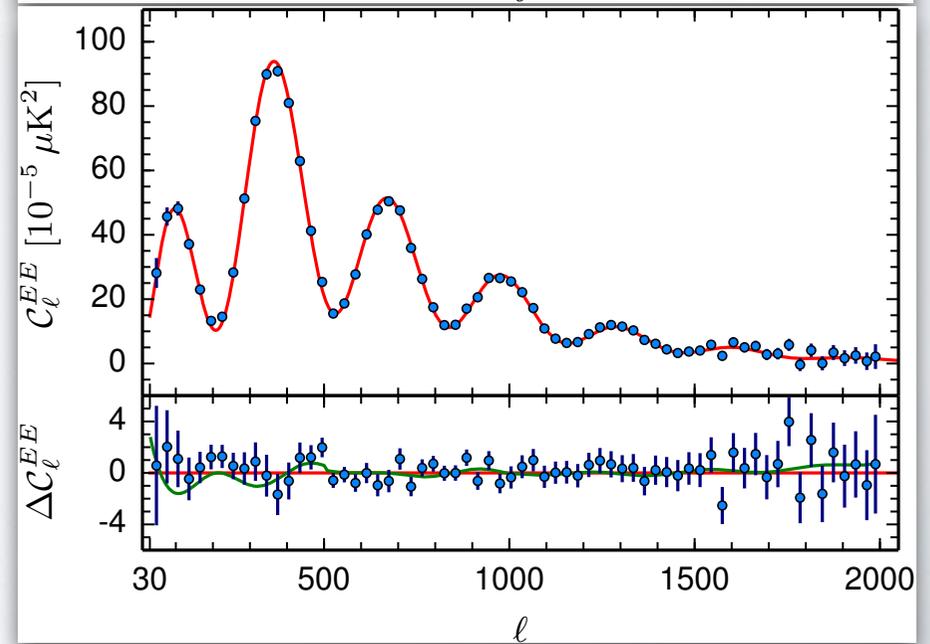
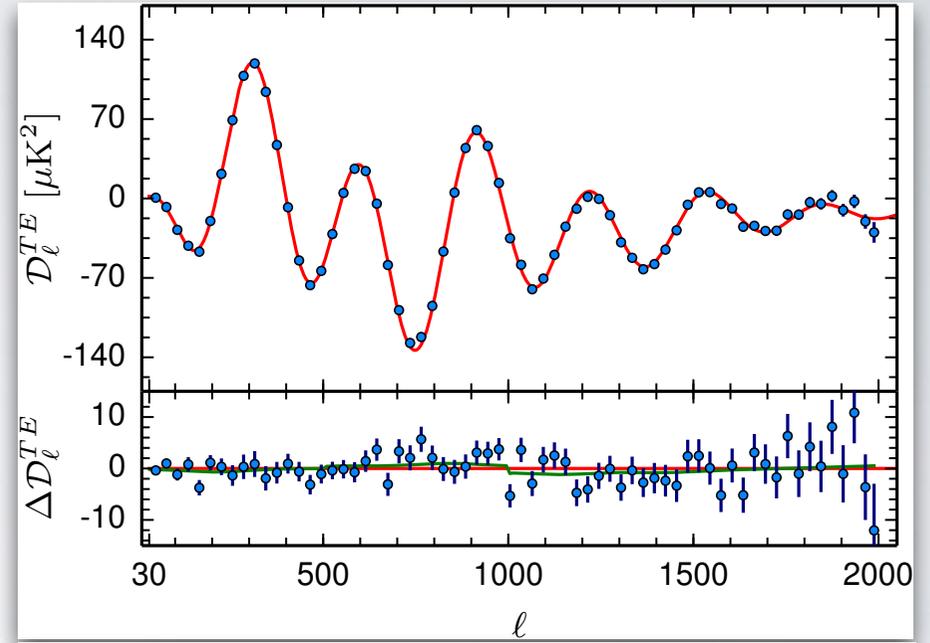


# OBSERVATIONS

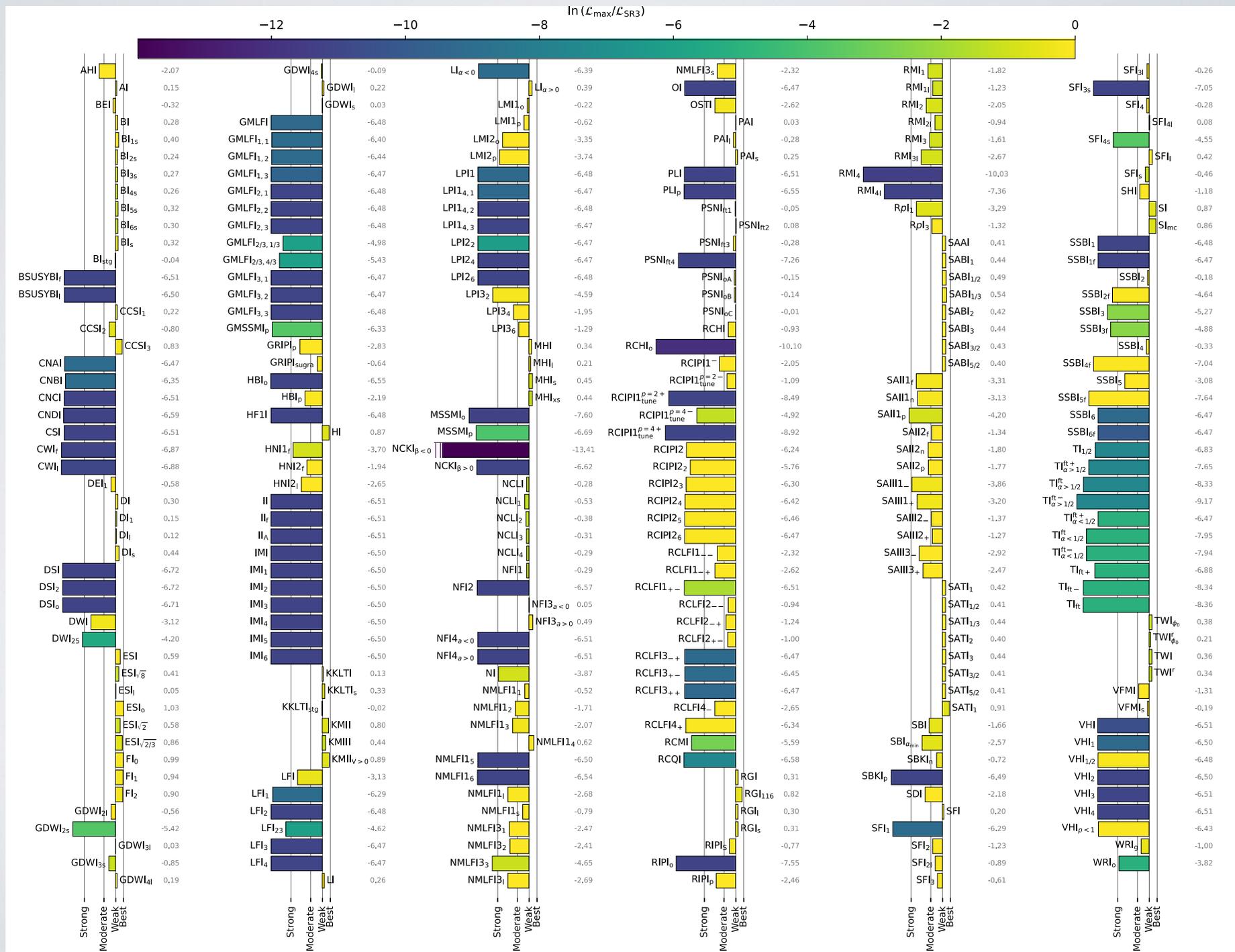


Planck 2015

$\Lambda\text{CDM}$  avec 6 paramètres



# COMPARAISON DE MODELES



# L'inflation rend-elle l'univers homogène?

C Joana 2024  
Quadratic potential

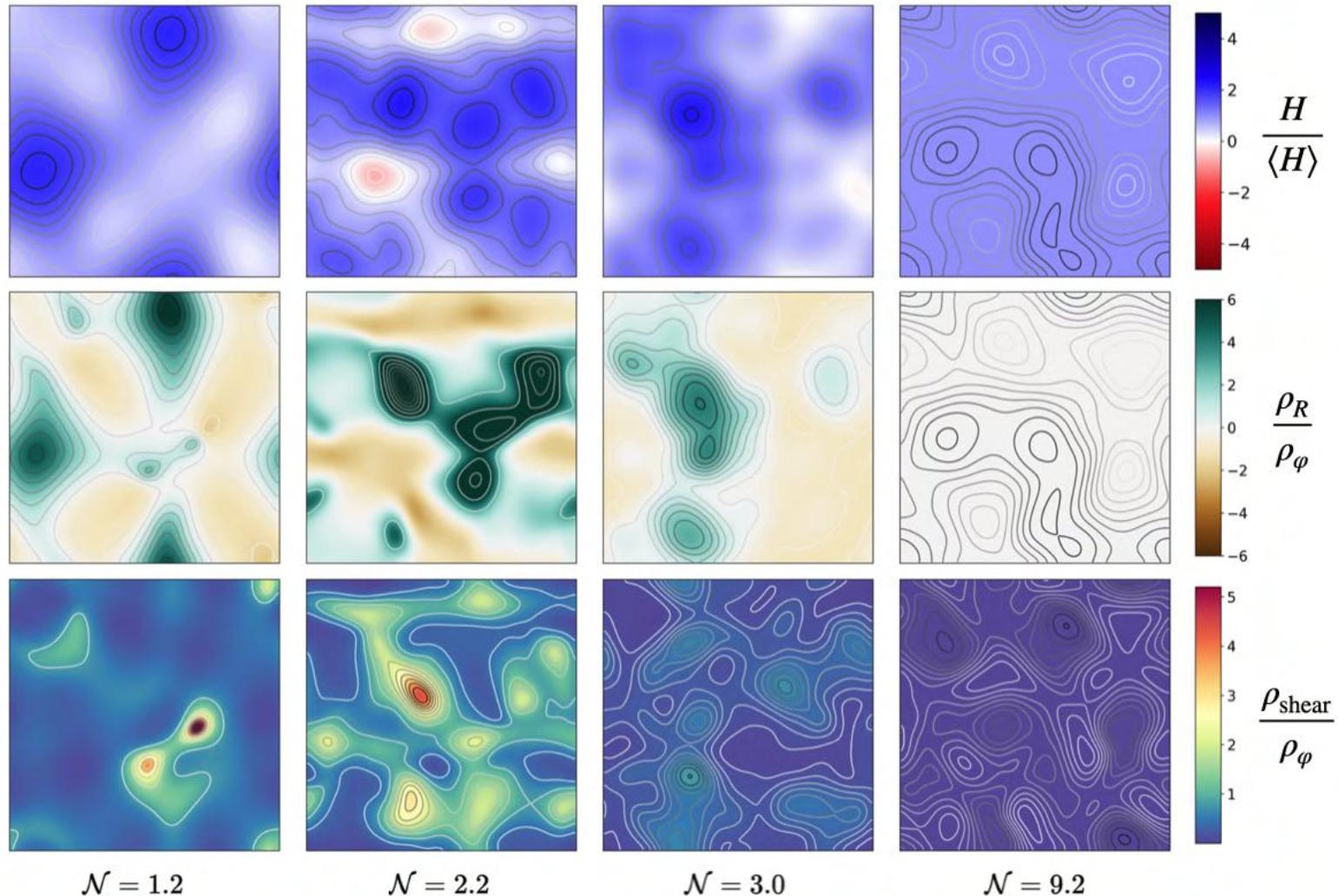
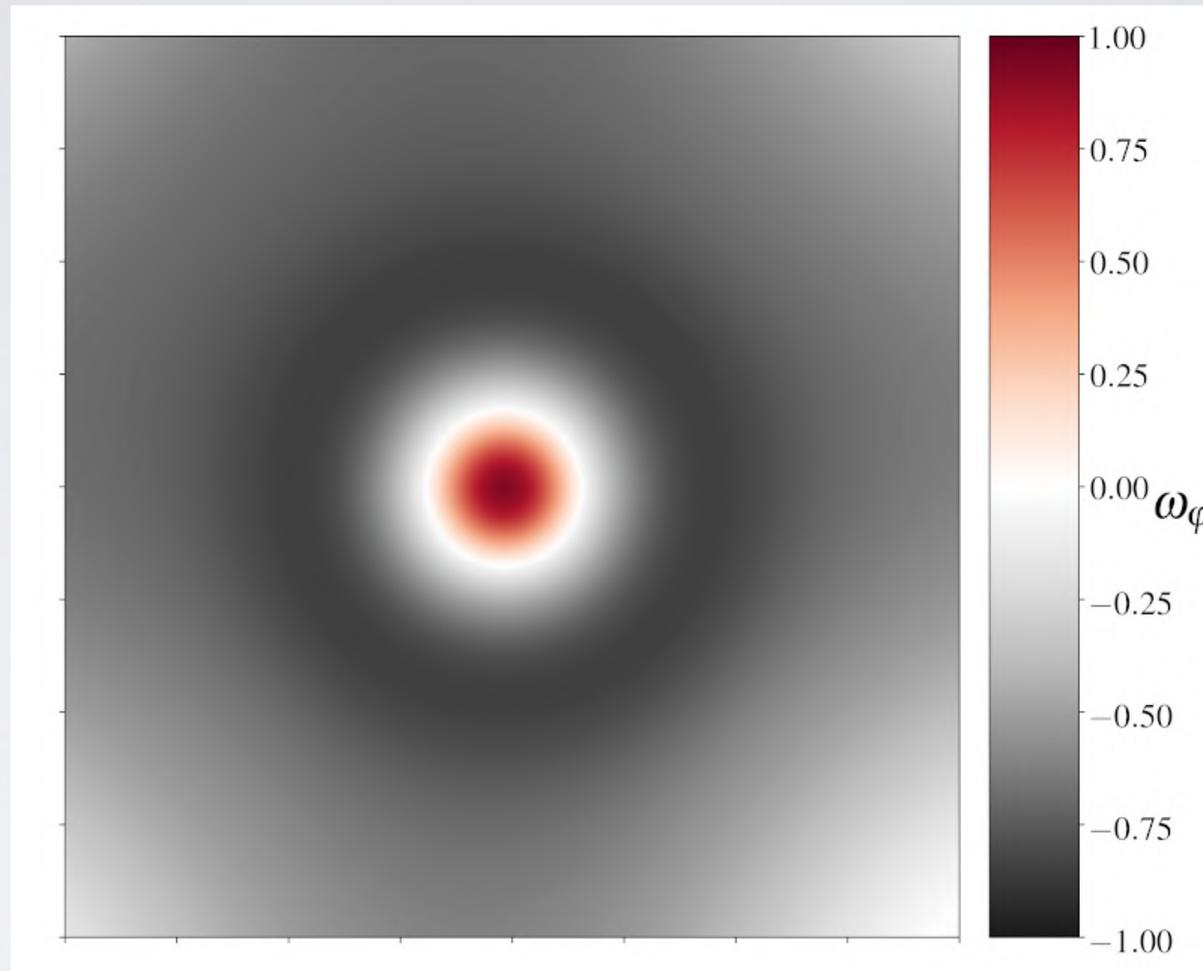


FIG. 3: Two-dimensional snapshots of the lattice configurations of the annotated quantity at the selected e-folding time. Top panel: the ratio of local-to-average Hubble rate; middle panel: the ratio of curvature-to-scalar energy density, and bottom panel: the ratio of shear-to-scalar energy density. All figures correspond to a simulation initially containing both tensor and vector gravitational modes represented in a black solid line in figure 1. Each plot contains ten equally spaced contours between max and min values at the time-hypersurface to help visualising the magnitude of the fluctuations.

# Trous noirs pré-inflationnaires



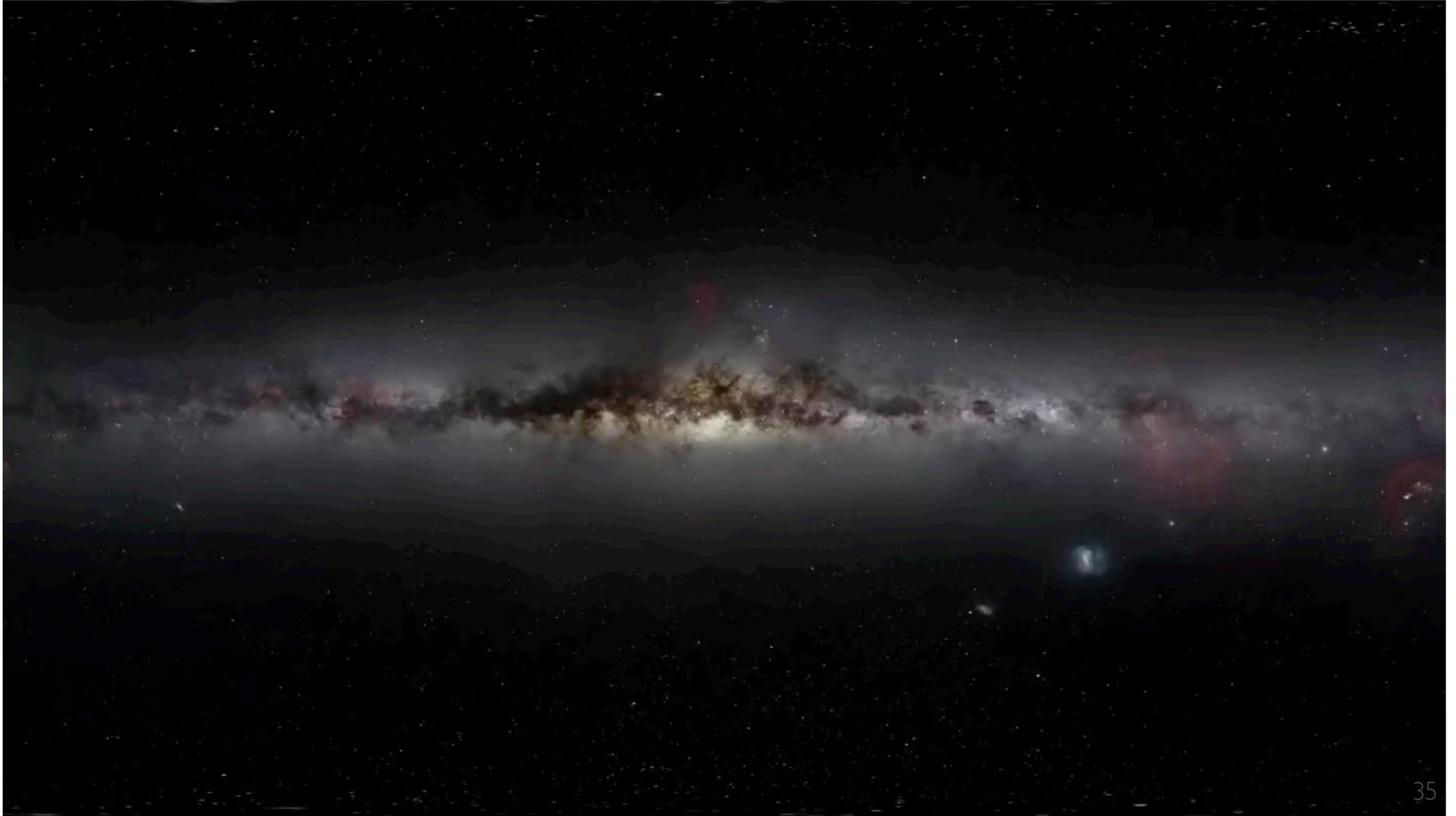
La formation de trous noirs pré-inflationnaires catalyse le démarrage de l'inflation, en piégeant l'énergie de gradient, ce qui lisse le champ scalaire et la métrique dans son voisinage.

# TROUS NOIRS

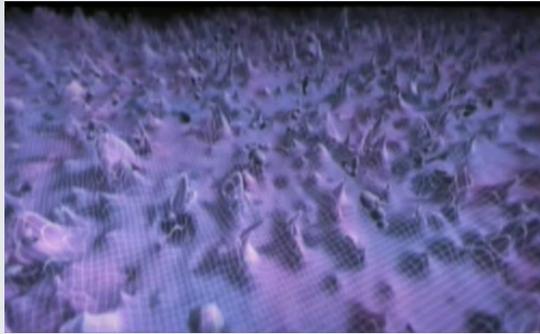


Sgr A\*

# TROUS NOIRS



# TROUS NOIRS PRIMORDIAUX



Vague scélérate



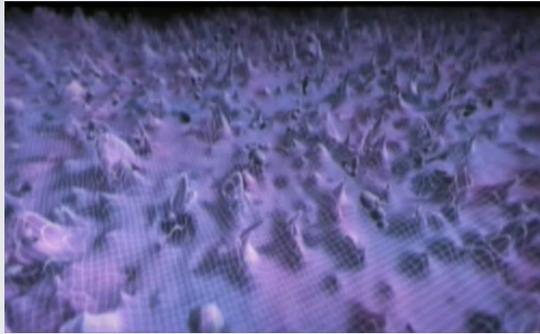
# TROUS NOIRS PRIMORDIAUX



Vague scélérate



# TROUS NOIRS PRIMORDIAUX



Effondrement gravitationnel  
en trou noir

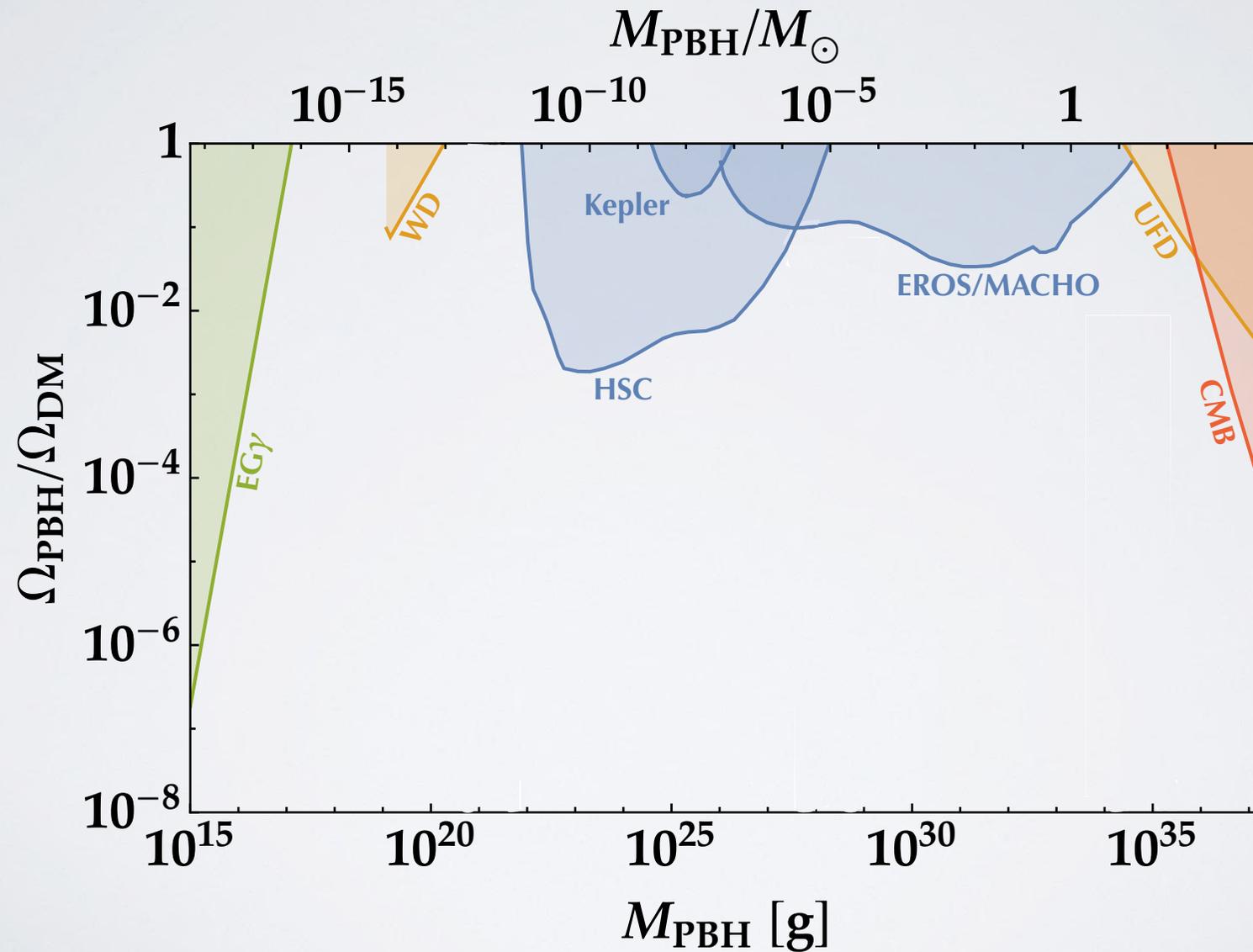


- Présents depuis l'univers primordial
- N'émettent aucun rayonnement
- Interagissent via la gravité uniquement



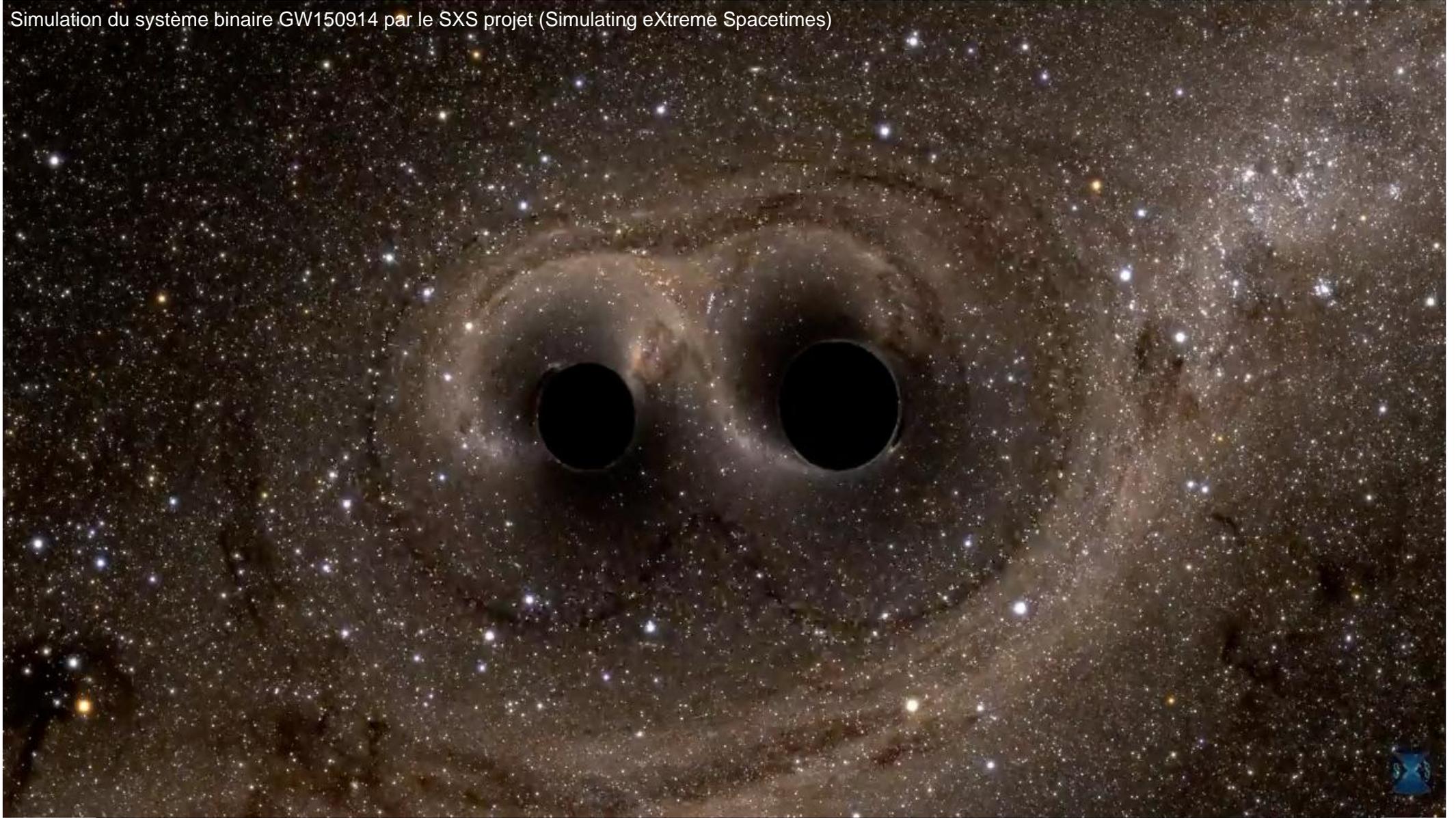
Matière noire?

# TROUS NOIRS PRIMORDIAUX



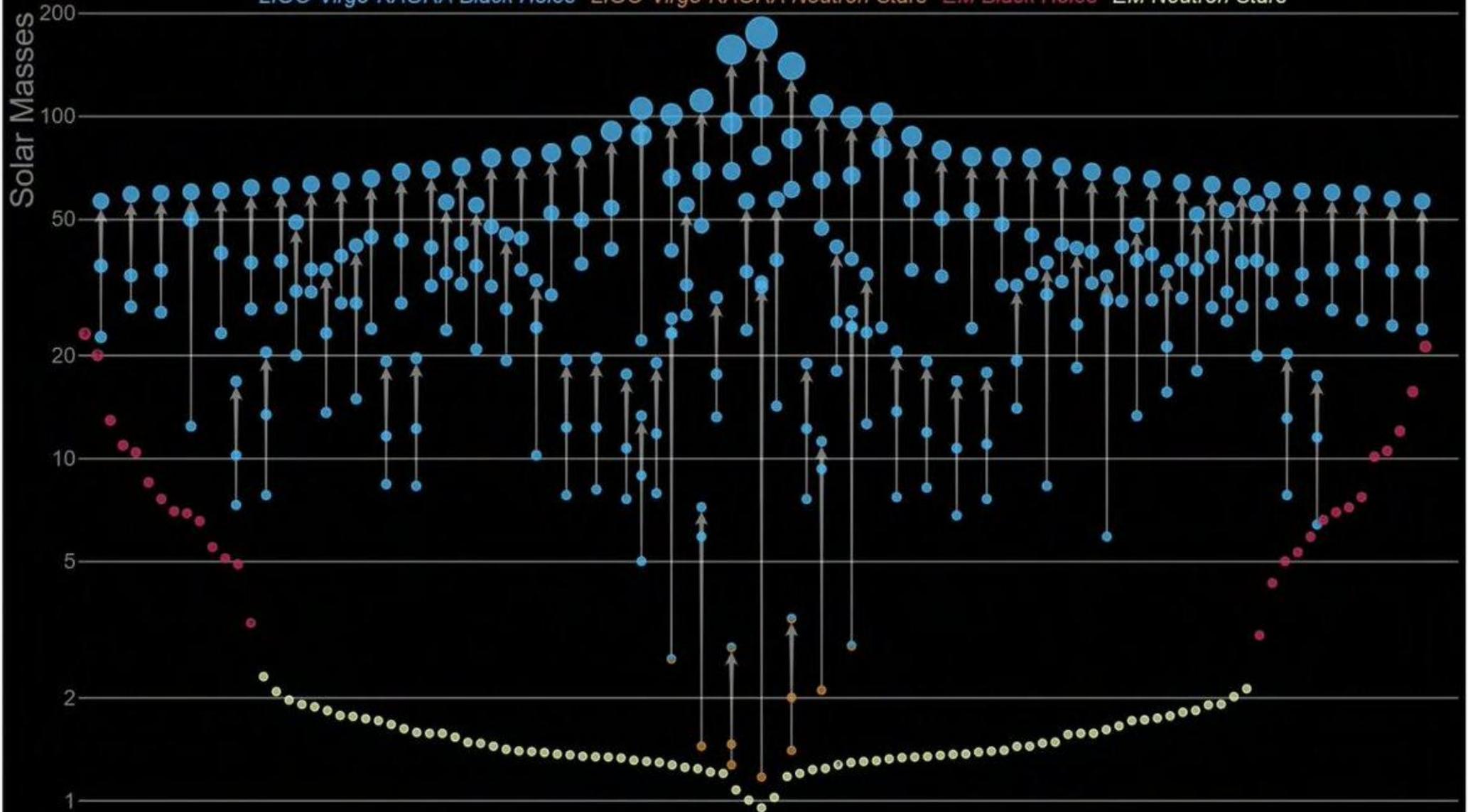
# PROGÉNITEURS DES FUSIONS OBSERVÉES PAR ONDES GRAVITATIONNELLES?

Simulation du système binaire GW150914 par le SXS projet (Simulating eXtreme Spacetimes)



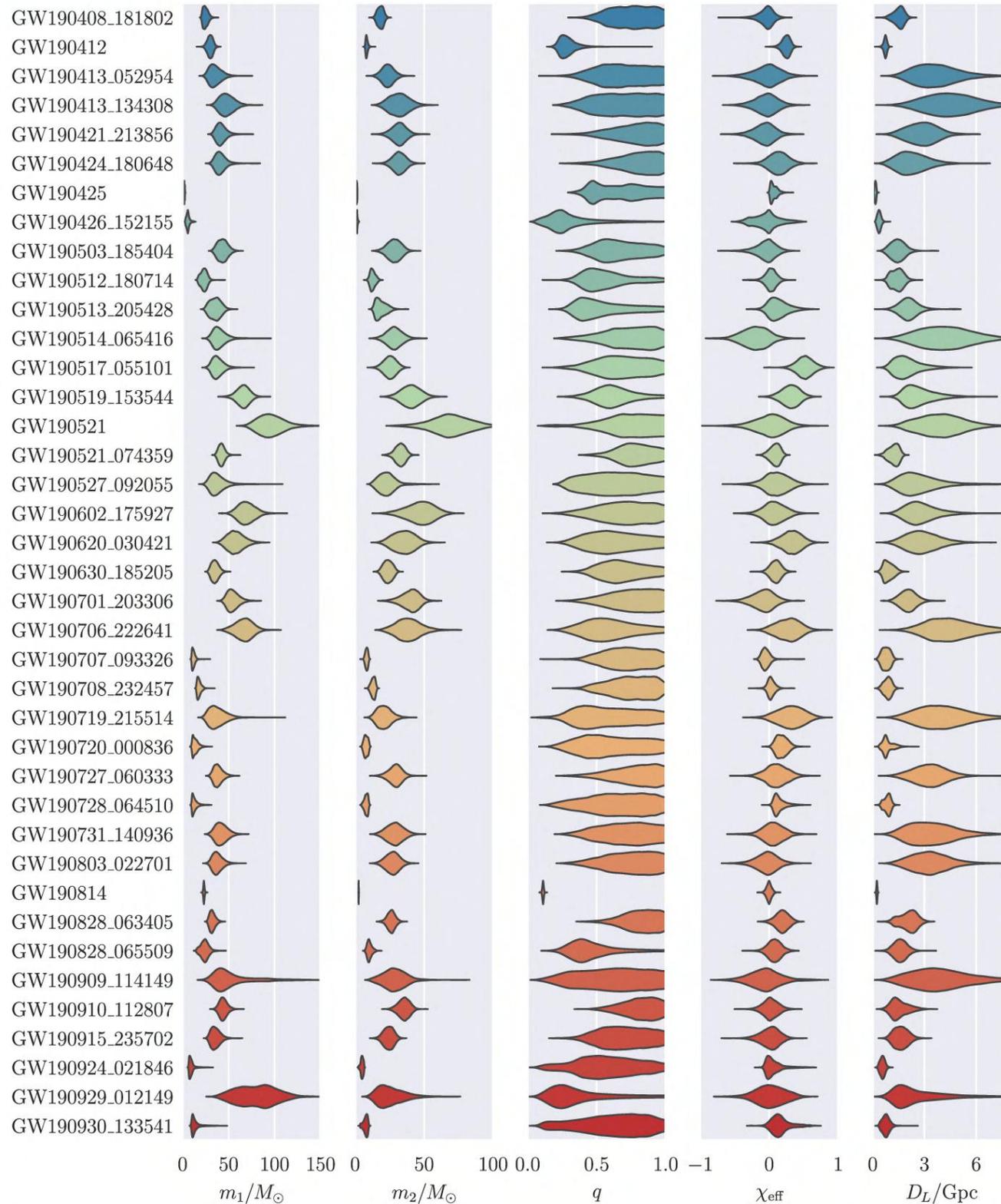
# Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

Credit: LIGO-Virgo-KAGRA / Aaron Geller / Northwestern



# LES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX EXPLIQUERAIENT DE NOMBREUX PROBLÈMES...

- Matière noire
- Faible spins observés par LIGO/VIRGO
- Existence de trous noirs super-massifs
- Existence de clusters de galaxies hyper-massifs at haut redshift, et de galaxies à un stade de maturité stellaire très avancé à un stade pourtant très précoce de l'univers...

# RESUMÉ

- L'inflation résout les problèmes du Big-Bang chaud et fournit un mécanisme (quantique) de production des fluctuations primordiales de densité.
- Ce mécanisme réalise des prédictions qui ont été confirmées par les observations astrophysiques.
- Des questions demeurent: quelle est la “particule” qui a réalisé l'inflation, comment s'est-elle désintégrée, comment les fluctuations quantiques sont-elles devenues classiques? etc...
- Les trous noirs primordiaux, s'ils existent, permettraient de résoudre plusieurs problèmes astrophysiques et cosmologiques... et d'en apprendre davantage sur l'inflation!

A vibrant nebula with red, blue, and purple hues against a starry background. The central part of the nebula is bright red and orange, transitioning to blue and purple towards the edges. The background is filled with numerous small white stars.

**Merci pour votre attention!**